



© INRAE LBE

**INRAE**



## Rapport Recherche et Innovation TRANSFORM 2023

Département Aliments, produits biosourcés et déchets  
TRANSFORM

# SOMMAIRE

Page 4: Les Plateformes

p7

Partie 1: Soutenir le développement d'une bioéconomie circulaire durable. Prédications, simulations et jumeaux numériques

p20

Partie 2: Construire la qualité des aliments et des systèmes alimentaires

p32

Partie 3: Améliorer l'acceptabilité de nouveaux aliments et diminuer les risques alimentaires

p50

Partie 4: Elaborer des matériaux biosourcés et valoriser les matières résiduelles

p58

Partie 5: Éclairer et appuyer les politiques publiques

p62

Contactez nos unités

## MENTIONS LEGALES

**Editeur:** Michael O'Donohue, Chef de département

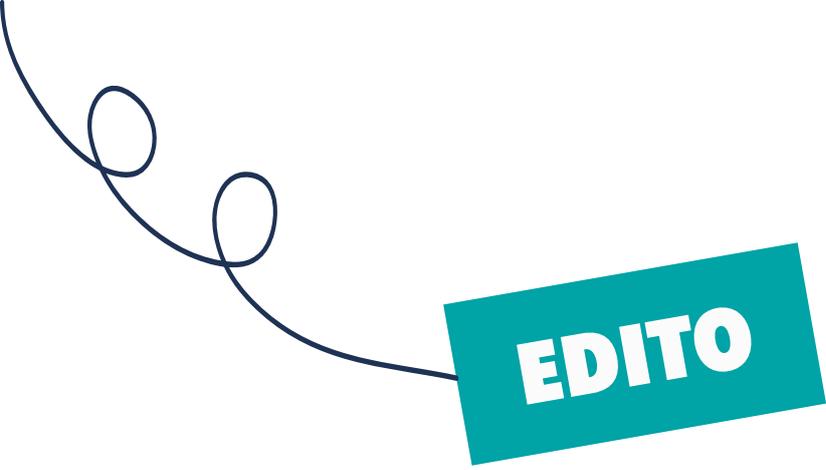
**Comité éditorial:** Jean-Philippe Steyer, Carole Tournier, Olivier Tranquet, Olivier Vitrac, Catherine Garnier, Patrick Dabert, Mathieu Schwartz, Maïa Meurillon, Laetitia Theron, Yassin Refahi, Carole Antoine-Assor, Rachel Boutrou, Laurence Fournaison, Mélanie Delclos.

**Design:** Mélanie Delclos

O'Donohue, et al (2023). Rapport Recherche et Innovation TRANSFORM 2023 Département Aliments, produits biosourcés et déchets. INRAE.

© INRAE - Photos: médiathèque INRAE, Adobe Stock, Pixabay, photo de couverture: © INRAE LBE





## EDITO

C'est avec plaisir que je vous présente l'édition 2023 du Rapport Recherche et Innovation du département TRANSFORM. Conformément à notre plan stratégique 2021-2025, ce document traite les différentes facettes de la bioéconomie circulaire, avec des travaux portant sur les aliments, les produits non-alimentaires biosourcés, et le devenir des matières en fin de vie.

Ce rapport a pour ambition de vous livrer un état des lieux actualisé de nos activités, en insistant sur la diversité de celles-ci. Ainsi, vous trouverez dans ce document de nombreux exemples de notre production scientifique, mais aussi des illustrations des méthodes et technologies que nous développons. De même, vous découvrirez la manière dont nous valorisons notre expertise riche et diverse pour appuyer la politique publique. Dans le contexte de la transition vers la bioéconomie circulaire, nous sommes plus que jamais convaincus que l'élaboration de décisions publiques devrait se fonder sur les connaissances scientifiques de pointe.

**Michael O'Donohue**  
**Chef de Département TRANSFORM**

# Infrastructures de recherche inscrites sur la feuille de route nationale

Les infrastructures de recherche sont au cœur d'enjeux économiques et industriels majeurs, le recours à ces infrastructures étant devenu, dans la plupart des disciplines, un impératif en termes de compétitivité scientifique et de rayonnement international. Les stratégies nationales et européennes dans le domaine des infrastructures de recherche se déclinent à travers des "Feuilles de route", celle de la France ayant été renouvelée en 2021.

TRANSFORM est au centre de trois infrastructures de recherche, IBISBA-EU sur la feuille de route européenne ESFRI et IBISBA-FR et CALIS sur la feuille de route nationale MESRI, au service d'une recherche multidisciplinaire d'excellence dans les domaines de la biotechnologie et de l'alimentation, respectivement.

## TRANSFORM au cœur d'IBISBA (Industrial Biotechnology Innovation and Synthetic Biology Accelerator)

### EU-IBISBA

Labellisée ESFRI 2018, IBISBA-EU est une infrastructure de recherche translationnelle qui entend accélérer le développement des biotechnologies industrielle et environnementale en Europe en tant que pivot de la bio économie circulaire. Fédérant les infrastructures de recherche de pointe de 10 pays européens et associant les dernières technologies numériques, IBISBA-EU propose aux communautés académique et industrielle un accès unique à des services R&D&I intégrés et innovants en biotechnologie, prenant le virage de l'ère de la « BioIndustry 4.0 ».

INRAE, au travers du département TRANSFORM, est pleinement investi dans la coordination d'IBISBA-EU et d'IBISBA-FR. L'offre de service proposée par l'institut est apportée par les plateformes du département : TWB, PICT-ICEO (TBI), AlgoSolis (GEPEA), Bio2E (LBE) et 3PE (BBF).

**Plus d'informations :** [ibisba.eu](http://ibisba.eu) - [ibisba.fr](http://ibisba.fr) / Contacts : [ibisba-fr@ibisba.eu](mailto:ibisba-fr@ibisba.eu) - [network@ibisba.fr](mailto:network@ibisba.fr)



### IBISBA-FR

IBISBA-FR, est une infrastructure française fruit de la coopération inter-organismes de plateformes technologiques offrant des services et formations à la recherche et à l'innovation dans les biotechnologies, dont une partie sont intégrés au sein d'IBISBA EU. Labellisée sur la feuille de route MESRI 2016 et reconduite en 2021, IBISBA-FR entend favoriser le développement des biotechnologies en France. Son prochain défi sera de se structurer et de se coordonner pour former le nœud français d'IBISBA-EU.

## TRANSFORM au cœur de CALIS (Consommateur – Aliment-Santé)

L'alimentation, source de forts enjeux économiques, sociaux environnementaux et de santé, constitue une préoccupation majeure des politiques publiques. L'infrastructure CALIS (Consommateur, Aliment, Santé) propose des offres de service et de développement méthodologiques et technologiques performantes et innovantes qui s'appuient sur une organisation distribuée nationale de différentes entités telles que (i) des plateformes analytiques et technologiques de conception et de caractérisation des aliments, (ii) des dispositifs d'études cliniques et d'épidémiologie nutritionnelle, (iii) des plateformes de bases de données de consommation alimentaire, et (iv) des dispositifs d'expérimentation et d'étude des comportements alimentaires. Ces dispositifs, portés par différents partenaires, sont regroupés en trois pôles : Consommateur, Aliment et Santé.

TRANSFORM est particulièrement présent dans le pôle « Aliment » via ses plateformes technologiques « Lait » (STLO) et « PLANET » (IATE) et son infrastructure analytique labélisée par INRAE « PROBE ». PROBE propose une expertise multidisciplinaire sur la caractérisation multi-échelle de la structure et des propriétés de systèmes biosourcés, notamment à usage alimentaire. PROBE met en œuvre des technologies de pointe complémentaires : spectrométrie de masse, RMN, IRM, microscopie, chemotypage, analyses sensorielles et études du comportement alimentaire et s'appuie sur une expertise innovante en traitement des données. PROBE repose sur les compétences de quatre plateformes, dont trois labélisées par INRAE, présentant une forte complémentarité en termes de molécules étudiées et d'approches : BIBS (BIA), ChemoSens (CSGA), AgroResonance (QuaPA) et Polyphénols (SPO).

**Contact :** [probe-ir@inrae.fr](mailto:probe-ir@inrae.fr) ; [calis-ir@inrae.fr](mailto:calis-ir@inrae.fr)





## Nos plateformes scientifiques



### A GRORESONANCE - UR QUAPA

Sous la forme de spectres ou d'images (IRM), la résonance magnétique nucléaire (RMN) offre un large éventail de méthodes analytiques capables d'identifier la structure chimique des composés, de quantifier la concentration et la dynamique de petites molécules ou de caractériser l'agencement des constituants de la matière à différentes échelles. Elle donne donc des informations précieuses sur la composition et la structure des tissus ou matériaux, ainsi que sur le fonctionnement du vivant.

La plateforme AgroResonance est une infrastructure du centre INRAE Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes. Elle réunit des compétences et un parc technologique de haut niveau pour proposer analyses et développements et répondre à des questions dans les domaines de l'agro-alimentaire, du végétal, de la nutrition et de la santé.

AgroResonance est certifiée ISO9001 et labellisée Infrastructure Scientifique Collective. Elle est membre fondateur de la plateforme régionale multimodale *In Vivo* Imaging in Auvergne (IVIA), labellisée par IBI SA, et a ainsi accès à la plupart des autres modalités d'imagerie *in vivo* clermontoises depuis l'animal jusqu'à l'homme.

**Contact:** [Guillaume.pages@inrae.fr](mailto:Guillaume.pages@inrae.fr)



### B IORESSOURCES : IMAGERIE, BIOCHIMIE & STRUCTURE (BIBS) - UR BIA

BIBS réunit des expertises dans différents domaines analytiques et en traitement des données, permettant de décrire - par différentes modalités et sur une gamme d'échelles allant du millimètre au nanomètre - les structures et architectures de systèmes agrosourcés et d'étudier les biopolymères qui les composent (polysaccharides, protéines, lipides).

Les méthodes permettent : i) de caractériser la structure des biopolymères (identification, quantification, modifications), leurs interactions, leur organisation (ordres locaux, mobilité), leur localisation ; ii) de suivre leur dégradation ou leur transformation ; iii) de cribler des collections d'échantillons sur des critères chimiques et structuraux ; iv) d'imager les systèmes par différentes modalités et à différentes échelles, de réaliser des imageries corrélatives ; v) d'aborder des paramètres dynamiques (diffusion).

**Contact:** [contacts-bibs@inrae.fr](mailto:contacts-bibs@inrae.fr)



### C HEMOSENS- UMR CSGA

ChemoSens est la plate-forme de recherche et développement méthodologique du Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation, basé à Dijon, dont l'originalité repose sur l'utilisation combinée de la chimie et de l'analyse sensorielle pour développer de nouvelles approches de caractérisation des aliments et du comportement alimentaire.

Les techniques d'analyse physico-chimique permettent de caractériser les molécules actives de la saveur d'un aliment et de suivre leur libération lors de la mastication. La plate-forme possède aussi une expertise dans l'analyse des lipides constitutifs de l'aliment et des tissus neurosensoriels.

ChemoSens jouit aussi d'une réputation internationale en sensométrie et certains de ses développements, comme la Dominance Temporelle des Sensations (DTS), sont mondialement reconnus. Elle a pu construire de vastes bases de données et elle a développé le logiciel Internet TimeSens® pour l'acquisition et l'analyse des données sensorielles.

**Contact:** [carole.tournier@inrae.fr](mailto:carole.tournier@inrae.fr)





## PLATEFORME LAIT (PFL) - UMR STLO

La PFL est une Installation Expérimentale ([https://www6.rennes.inrae.fr/plateforme\\_lait](https://www6.rennes.inrae.fr/plateforme_lait)) capable de mettre en œuvre divers processus technologiques sur une même unité de lieu, à différentes échelles, et selon des itinéraires technologiques flexibles et maîtrisés incluant le fractionnement des constituants des matières premières, la réalisation de matrices plus ou moins concentrées, fermentées ou non (produits frais, fromages, lait concentré ou matrices végétales) et le séchage. D'une surface de 1000 m<sup>2</sup>, elle a été entièrement réaménagée en 2013, est certifiée ISO 9001 et labélisée Infrastructure Scientifique Collective INRAE. La plateforme est ouverte aux partenariats académiques et industriels. Son fonctionnement s'appuie sur des expertises internes (technologie, génie des procédés, biochimie, microbiologie, nutrition et écoconception) mises en œuvre dans des projets de recherche académiques ou privés ainsi que dans les programmes de formation des futurs cadres de l'industrie alimentaire.

Contact: [gilles.garric@inrae.fr](mailto:gilles.garric@inrae.fr)



## DISPOSITIF PLANET - UMR IATE

La plateforme PLANET (Processing of Plant products with Emergent Technologies) de l'UMR IATE est une plateforme technologique travaillant sur la transformation et la valorisation des ressources végétales (céréales ; légumineuses ; pailles ; bois ; algues ; ...) ou bio-sourcées (bio-polymères). PLANET regroupe un ensemble original d'équipements pilotes instrumentés permettant d'étudier et de caractériser les principales opérations unitaires de transformation des végétaux. Cette approche permet d'optimiser l'utilisation des ressources naturelles (produits et coproduits, énergie) et d'étudier l'impact des procédés sur leurs propriétés fonctionnelles. Les activités de la plateforme concernent différentes thématiques : le fractionnement, séparation et tri de matière végétale par voie sèche ; la structuration et le traitement hydro-thermique d'agro-composites (alimentaire et non-alimentaire) ; et la caractérisation des milieux granulaires et continus. La plateforme PLANET apporte ses compétences techniques pour étudier les relations entre la structure de la matière première, les procédés et les propriétés d'usage des matériaux obtenus.

Contact: [contact-planet@inrae.fr](mailto:contact-planet@inrae.fr)



## TOULOUSE WHITE BIOTECHNOLOGY (TWB)

Expert dans la conduite de projets de recherche et développement (R&D), TWB accompagne l'industrie dans le développement de solutions innovantes et durables pour le bien de la planète et des hommes. TWB monte et conduit, dans le domaine des biotechnologies industrielles, des projets de R&D en collaboration avec des laboratoires publics et des industriels, accompagne le développement de start-up en leur proposant notamment un hébergement dans ses locaux dans un environnement scientifique et technologique de pointe et favorise l'émergence d'innovations de rupture. En réunissant chercheurs, entrepreneurs, financeurs, institutionnels et industriels, TWB intègre et valorise toutes les compétences et expertises et crée des synergies tout en simplifiant la relation contractuelle. TWB accélère ainsi efficacement le processus d'innovation nécessaire à l'émergence d'une industrie éco-responsable. Depuis son lancement en 2012 sous la triple tutelle INRAE, INSA et CNRS, et fort de son consortium de 49 membres privés et publics au 1er janvier 2023, TWB a contribué à la réalisation de plus de 285 projets collaboratifs de R&D et à la croissance de nombreuses start-up qui ont levé au total plus de 250 M€.

Contact: [laurie.rey@inrae.fr](mailto:laurie.rey@inrae.fr)



## PLATEFORME BIO2E - UR LBE

La plateforme Bio2E, Biotechnologie et Bioaffinerie Environnementales, est spécialisée dans le traitement et la valorisation des effluents et résidus organiques (urbains, agricoles, agro-industriels) sous forme de matière et d'énergie par des bioprocédés intégrés (méthanisation, bio-méthanation, bio-hydrogène, microalgues) et physico-chimiques (pré-, post-traitements) afin de minimiser les impacts des filières sur l'environnement. Elle rassemble l'offre de recherche partenariale du LBE et héberge les activités de prestation de service de Metys d'INRAE-Transfert. Cette articulation permet de proposer une offre adaptée aux besoins de ses partenaires, allant du test de laboratoire au suivi d'installations industrielles : R&D collaborative, prestations analytiques, études de faisabilité, formations, expertise et hébergement.

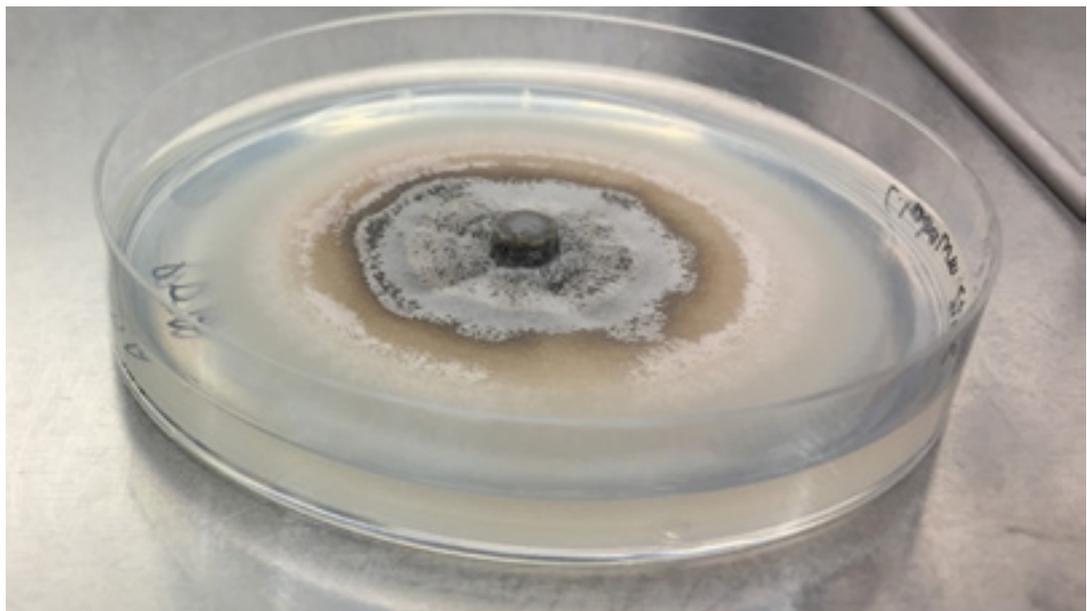
Contact: [audrey.battimelli@inrae.fr](mailto:audrey.battimelli@inrae.fr)



## Partie 1

Soutenir le développement d'une bioéconomie circulaire durable

### Prédictions, simulations et jumeaux numériques



© David Ribeaucourt - Culture fongique

De nombreux moyens (bio)-technologiques sont développés au sein de nos unités pour *in fine* développer des méthodes de production, transformation et consommation plus durables. La biologie de synthèse est illustrée ici par la découverte et l'utilisation de nouvelles enzymes pour synthétiser des molécules d'intérêt. Nous montrons également comment nos chercheurs font évoluer les techniques d'imagerie pour comprendre divers phénomènes. Une importance particulière est portée aux eaux usées pour en extraire des molécules d'intérêt ou traiter leurs micropolluants avec un bénéfice environnemental global.

La prédiction, la simulation et les jumeaux numériques sont des catalyseurs d'innovation pour un avenir durable car ils permettent d'explorer virtuellement des solutions écologiques ayant des bénéfices environnementaux et sociétaux. Nos chercheurs les utilisent pour étudier la dynamique des aliments, de leur fabrication à leur digestion.

© Dr Julien Durand  
Structure moléculaire d'une nouvelle  
glycoside-phosphorylase, et ses cristaux (en  
haut à gauche)

## De nouvelles enzymes pour la synthèse d'oligosaccharides d'intérêt pour la santé humaine



### En savoir plus

Li A. *et al.*

Discovery and Biotechnological  
Exploitation of GlycosidePhosphorylases.

International Journal of Molecular  
sciences . 2022

<https://doi.org/10.3390/ijms23063043>

Licence d'exploitation exclusive du brevet  
international PCT/FR2021/050827 cédée  
à la société SweeTech

### Partenariat

- Plateforme BIBS\_INRAE Nantes  
(David Ropartz)



- SweeTech (<https://www.sweetech.fr>,  
Julien Durand)

Projet H2020 FNR-2020 :Rapid discovery  
and development of enzymes for novel  
and greener consumer products (RadicalZ)

### Contacts

Gabrielle Potocki-Veronese et Julien  
Durand

UMR TBI

[veronese@insa-toulouse.fr](mailto:veronese@insa-toulouse.fr)

[j.durand@sweetech.fr](mailto:j.durand@sweetech.fr)



### Contexte

Les glycoside-phosphorylases (GPs) sont des enzymes fascinantes, qui sont capables à la fois de catalyser des réactions de dégradation des oligomères et polymères de sucres grâce au phosphate inorganique présent dans les cellules, mais aussi la réaction inverse, c'est-à-dire leur synthèse à partir de sucres-phosphates.

Très peu de GPs ont été caractérisées à ce jour, alors qu'elles sont impliquées dans d'importants processus biologiques, en particulier dans le système digestif des mammifères. En effet, en fonction de leur spécificité, certaines GPs bactériennes sont impliquées dans le métabolisme des glycosides d'origine végétale, humaine ou microbienne, participant ainsi aux interactions entre le microbiote intestinal humain, l'aliment et l'hôte. Par ailleurs, leur mécanisme catalytique original peut être exploité pour la synthèse de glycosides à haute valeur ajoutée, présentant un intérêt majeur pour de nombreuses applications liées à la santé humaine en particulier.

### Résultats

Pour accélérer la découverte de nouvelles GPs, une approche couplant l'analyse multi-étapes d'une large diversité de séquences génomiques et métagénomiques, et le criblage fonctionnel de l'activité et de la spécificité de ces enzymes a été développée. En explorant ainsi un espace de séquences de plusieurs dizaines de millions de séquences, de nouvelles fonctions enzymatiques

ont été identifiées. Plusieurs enzymes impliquées dans les interactions microbiennes au sein du microbiome intestinal humain, y compris dans des contextes pathologiques, ont été mises en lumière. La spécificité originale de certaines d'entre elles a été exploitée pour synthétiser *in vitro* et *in cellulo*, dans un châssis bactérien obtenu par ingénierie métabolique, des oligosaccharides d'intérêt pour la santé humaine, commercialisés par la start-up SweeTech. Il s'agit entre autres de glycosides antigéniques, qui peuvent être utilisées pour la détection, la prévention et le traitement d'infections à Candida, une levure pathogène opportuniste. Les candidoses représentent un enjeu majeur de santé publique. Elles affectent plus de 300 millions de personnes par an dans le monde, et sont létales dans leurs formes les plus sévères, notamment chez les patients immunodéprimés. Enfin, le potentiel d'autres GPs de spécificités différentes est actuellement évalué dans le cadre du projet européen RadicalZ pour la synthèse d'oligosaccharides d'intérêt nutritionnel.

### Perspectives

L'enjeu actuel est d'améliorer la prédiction de spécificité des glycoside-phosphorylases pour la synthèse d'oligosaccharides et de glycoconjugués fonctionnels de structures et potentiels applicatifs variés. La prédiction intégrera, par des approches d'apprentissage automatique, les données structurales et biochimiques acquises à haut débit, notamment par criblage microfluidique.



©Adobe Stock- Svetlana Wall  
Tiges de Maïs

## Comprendre la récalcitrance de la biomasse lignocellulosique grâce à l'imagerie en temps réel



### En savoir plus

Leroy A. *et al.*

Real-time imaging of enzymatic degradation of pretreated maize internodes reveals different cell types have different profiles

Bioresource Technology . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127140>

### Partenariat

• INRAE UR BIA BIBS,



• Synchrotron SOLEIL

### Contacts

Fabienne Guillon et Gabriel Paës

UR BIA et UMR FARE

[fabienne.guillon@inrae.fr](mailto:fabienne.guillon@inrae.fr)

[gabriel.paes@inrae.fr](mailto:gabriel.paes@inrae.fr)



### Contexte

La conversion biochimique de la biomasse lignocellulosique pour l'obtention de composés biosourcés est une approche attractive en raison de la sélectivité des enzymes et de leur mise en œuvre en conditions «douces». Cependant, sans prétraitement préalable, les rendements de conversion par voie biochimique sont faibles. Différentes technologies de prétraitement sont employées pour surmonter la récalcitrance de la biomasse à la dégradation enzymatique. Optimiser les technologies de prétraitement nécessite de mieux comprendre les changements qu'ils induisent et l'impact sur la dégradation enzymatique en prenant en compte l'hétérogénéité de la biomasse lignocellulosique. Toutefois, les techniques utilisées classiquement ne permettent pas de visualiser simultanément la localisation des enzymes dans les tissus et leur effet sur l'architecture et la composition sur les parois végétales.

### Résultats

Une approche d'imagerie exploitant la lumière du synchrotron SOLEIL et l'imagerie MALDI a été mise en œuvre sur des coupes d'échantillons de tiges de maïs natives et prétraitées hydrothermiquement. L'imagerie en temps réel a permis de visualiser l'évolution de la distribution des enzymes au sein de l'échantillon et de suivre la cinétique de la dégradation des parois cellulaires.

Le prétraitement hydrothermique induit une nouvelle hétérogénéité de composition des parois en fonction des types cellulaires et de la position dans l'entrenœud des tiges de maïs. Les cellules du parenchyme de la moelle les plus distantes de l'écorce et les plus en contact avec l'eau sont plus fortement affectées par le prétraitement. Des variations de rendement et de cinétique de dégradation des parois cellulaires sont mises en évidence. Les profils de dégradation ont été corrélés à la distribution non homogène des enzymes qui se concentrent préférentiellement au début de la réaction sur les parois riches en cellulose accessible, puis diffusent vers les parois plus récalcitrantes. Toutefois, les parois de l'écorce et des faisceaux vasculaires riches en lignines demeurent résistantes à la dégradation enzymatique.

### Perspectives

Progresser dans notre compréhension de l'effet du prétraitement hydrothermique pour une meilleure maîtrise nécessiterait de mieux appréhender les facteurs limitant le transfert de chaleur et de diffusion de l'eau dans des échantillons aussi hétérogènes que la biomasse lignocellulosique. La caractérisation des interactions entre les polymères, entre les polymères et les enzymes, et de l'organisation des polymères au sein de la paroi est également un point clé pour expliquer la plus ou moins grande réactivité des tissus lignocellulosiques aux prétraitements et à l'action des enzymes.

## Une technique d'imagerie innovante pour diminuer la teneur en sel des aliments



### En savoir plus

Clerjon S. et al.

Quantitative sodium magnetic resonance imaging in food: Addressing sensitivity issues using single quantum chemical shift imaging at high field

MCR . 2022

<https://doi.org/10.1002/mrc.5239>

### Partenariat

CSGA, INRAE, Dijon



Projet ANR Sal&Mieux ANR-19-CE21-0009

### Contact

Sylvie Clerjon

UR QUAPA

[sylvie.clerjon@inrae.fr](mailto:sylvie.clerjon@inrae.fr)



### Contexte

Pour votre santé, évitez de manger trop gras, trop sucré, trop salé. Il est bien connu que le sel ingéré en trop grande quantité augmente le risque de maladies cardiovasculaires. La diminution du sel dans nos aliments est donc encore aujourd'hui un enjeu majeur de santé publique.

Au-delà de l'amélioration des régimes alimentaires, l'optimisation du salage industriel permet à la fois de réduire la consommation énergétique, et de diminuer les rejets en NaCl dans l'environnement.

Les outils analytiques permettant d'objectiver des solutions pour diminuer le sel, sans altérer le goût, sont nécessaires pour proposer de nouvelles pratiques domestiques et optimiser les procédés de salage industriels. C'est dans ce cadre que nous avons développé un nouvel outil de cartographie du sodium dans les aliments.

### Résultats

Les propriétés nucléaires du sodium rendent difficile sa cartographie en IRM. La solution développée est originale et consiste à enregistrer l'ensemble du signal temporel après l'excitation, en chaque voxel de l'image. La décroissance de ce signal est ensuite modélisée pour chaque voxel par une décroissance monoexponentielle.

Les paramètres de cet ajustement (amplitude, temps caractéristique) donnent à la fois la quantité de sodium et son état de liaison à la matrice. Cette solution permet ainsi de distinguer des gradients de sel auparavant invisibles en IRM.

Ces résultats s'inscrivent dans le projet ANR Sal&Mieux et fournissent des cartographies du sodium exploitables pour comprendre les liens entre répartition et sensodisponibilité ainsi que les déterminants de la sensation salée. Ils permettent aussi d'accompagner le développement de solutions permettant de diminuer la quantité de sel par l'optimisation des procédés industriels et des usages domestiques, par exemple en jouant sur la répartition du sel, connue pour moduler la sensation. Cette nouvelle méthode d'imagerie non destructive, fait maintenant partie de l'offre de service de l'infrastructure de recherche PROBE.

### Perspectives

L'étape suivante est de faire le lien entre la sensodisponibilité du sodium, mesurée par analyse sensorielle et mesures instrumentales de relargage en bouche du sodium (ANR Sal&Mieux), et les propriétés de liaisons et de répartitions obtenues en RMN/IRM. Cet ensemble de connaissances nous permettra, *in fine*, de faire des recommandations de pratiques de salage domestiques optimum.

## Déterminants de la friabilité du maïs fourrage



### En savoir plus

Berger M. *et al.*

Friability of Maize Shoot (*Zea mays L.*) in Relation to Cell Wall Composition and Physical Properties

Agriculture . 2022

<https://doi.org/10.3390/agriculture12070951>

### Partenariat

- Société Limagrain Europe,
- INRAE UR BIA,
- INRAE UMR IATE,
- INRAE UR Herbivores



### Contacts

Cécile Barron, Fabienne Guillon et Marie-Françoise Devaux

UMR IATE et UR BIA

[cecile.barron@inrae.fr](mailto:cecile.barron@inrae.fr)

[fabienne.guillon@inrae.fr](mailto:fabienne.guillon@inrae.fr)

[marie-francoise.devaux@inrae.fr](mailto:marie-francoise.devaux@inrae.fr)



### Contexte

La qualité fourragère de la plupart des hybrides de maïs stagne depuis une quarantaine d'années, et les efforts de sélection ont été concentrés sur les rendements en grain et les qualités agronomiques.

L'amélioration de la valeur alimentaire du maïs fourrage est principalement envisagée par l'augmentation d'une de ses composantes, la digestibilité. Une seconde composante, peu étudiée, est l'ingestibilité définie par la quantité de fourrage volontairement ingérée par l'animal. L'ingestibilité serait en partie gouvernée par la friabilité du fourrage, mesurée par sa capacité à être réduit en particules de plus petite taille.

L'évaluation et l'identification des déterminants structuraux de cette propriété devraient permettre à terme de proposer des marqueurs de l'ingestibilité utilisables en sélection.

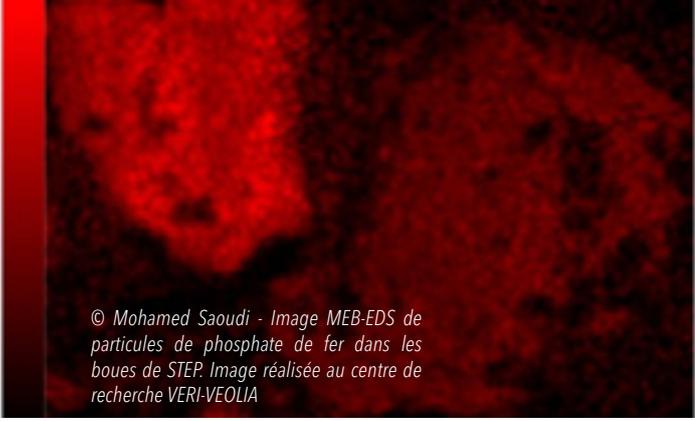
### Résultats

La friabilité de lignées de maïs fourrage (plante entière sans épi) a été évaluée par leur comportement au broyage. Deux indices ont été proposés: l'un basé sur l'énergie nécessaire pour atteindre une taille de particule cible, l'autre sur la quantité de particules fines produites en fournissant la même énergie de broyage. Ces deux indices permettent de discriminer différentes lignées selon leur friabilité. Compte

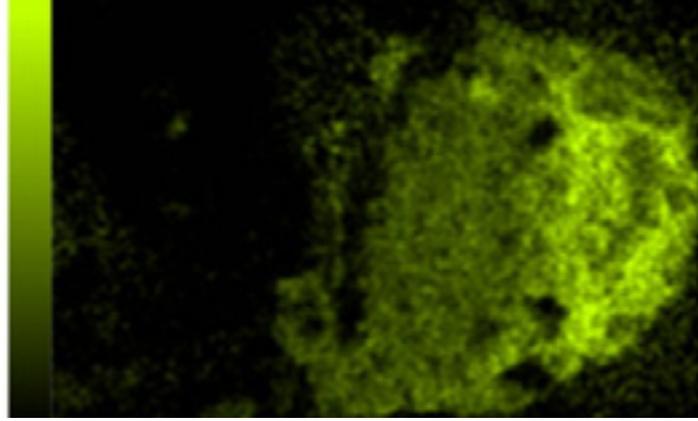
tenu des différents modes de broyage utilisés, ces deux indices révèlent une friabilité à différentes échelles. La friabilité, qui varie d'un facteur deux au sein de cette collection d'échantillons, a été reliée à la grande variabilité des lignées en termes d'anatomie, aspect des particules après broyage à l'ensileuse et composition des parois végétales. Si les deux indices sont sensibles à l'organisation cellulaire des tiges de maïs, le second indice traduit aussi une différence de composition entre les échantillons. Ainsi, plus la plante entière sans épi est riche en hémicellulose plus elle est friable. L'impact de la lignine n'a pas été mis en évidence mais devra être abordé via une caractérisation plus fine des composés phénoliques présents dans la plante entière sans épi.

### Perspectives

La mise en œuvre de ces deux estimations permet d'appréhender globalement et de manière complémentaire la friabilité du maïs fourrage. L'application et le transfert comme outil de sélection est en cours à travers des collaborations. Si les mesures de friabilité ont été validées par des essais sur animaux, en mastication ingestive, cette approche doit être complétée en parallèle par des mesures d'ingestibilité.



© Mohamed Saoudi - Image MEB-EDS de particules de phosphate de fer dans les boues de STEP. Image réalisée au centre de recherche VERI-VEOLIA



## Extraire le phosphore des effluents : et si on faisait travailler les bactéries ?



### En savoir plus

<https://doi.org/10.1080/09593330.2021.2023222>

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135704>

### Partenariat

- INRAE UR OPAALE,
- INRAE UR REVERSAAL,
- VEOLIA

### Contact

Marie-Line Daumer

UR OPAALE

marie-line.daumer@inrae.fr



### Contexte

Pas de vie sans phosphore (P) ! Apporté sous forme d'engrais aux plantes, c'est l'un des composants indispensables de notre alimentation, mais pour être efficace il doit être consommé en excès. Le surplus, rejeté par l'organisme se retrouve dans les eaux usées. La récupération du P des eaux usées répond à trois enjeux majeurs :

- Préserver les réserves minières de P limitées à quelques centaines d'années
- Assurer l'indépendance alimentaire de l'Europe presque totalement dépourvue de ces ressources.
- Réduire les fuites vers l'environnement pour limiter l'eutrophisation qui étouffe les eaux de surface

Pour éviter les fuites dans l'environnement, le P des eaux usées est concentré dans les boues de station d'épuration (STEP) le plus souvent par l'ajout de sels de fer. L'épandage des boues sur les surfaces agricoles permet de recycler une partie du P mais il devient de plus en plus difficile de trouver les surfaces agricoles suffisantes pour tirer parti de tout le phosphore des boues. L'enjeu est alors de dissoudre le P des boues pour l'extraire et fabriquer des engrais substituables aux engrais minéraux dans les régions agricoles.

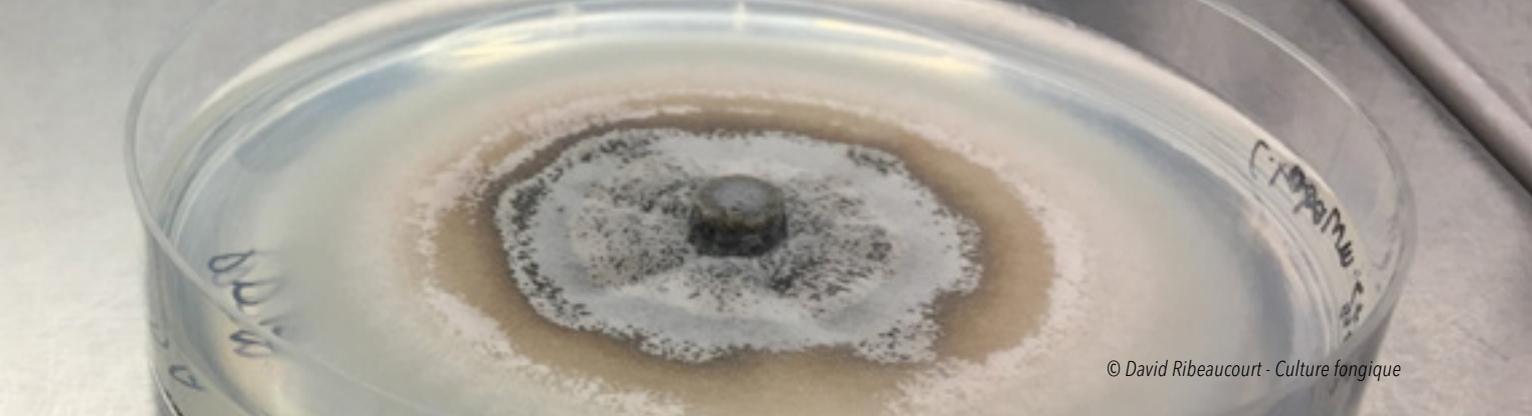
### Résultats

Le procédé rustique d'acidification biologique développé à l'UR OPAALE

consiste à favoriser la croissance de bactéries capables de dissoudre jusqu'à 75 % du P des boues sans réactifs chimiques. Plus efficace qu'une acidification chimique, ses performances varient cependant d'une boue à l'autre en fonction des formes sous lesquelles se trouve le P et notamment du type de composés formés avec le fer. Après le développement de méthodes appropriées, les travaux ont mis en évidence différentes formes de phosphate de fer dans les boues et un lien statistique avec le type de technologies utilisées en amont pour piéger le P des eaux usées a été établi. Les travaux ont aussi permis d'élucider le gain d'efficacité du procédé biologique en identifiant les trois mécanismes en jeu lors de la dissolution du P: la baisse du pH, le relargage du P accumulé par la biomasse et la réduction de certains types de phosphates de fer(III) par les bactéries.

### Perspectives

Ces résultats ouvrent des voies pour adapter les pratiques de déphosphatation des eaux usées à une meilleure récupération du P mais également au recyclage du fer. Au-delà des boues de STEP, la bioacidification est un procédé prometteur pour valoriser le P d'autres effluents tels que les boues piscicoles ou les effluents d'élevage et réduire l'impact environnemental des filières.



© David Ribeaucourt - Culture fongique

## Production d'aldéhydes parfumés par de nouvelles oxydases à cuivre fongiques



### En savoir plus

<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c07406>

<https://doi.org/10.1021/acscatal.1c05334>

<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107787>

### Valorisation

En parallèle de ces travaux, un procédé de photoactivation de ces oxydases fongiques a également été développé afin de contrôler l'activité de ces enzymes pour la conversion d'alcools d'intérêt industriels en aldéhydes (Brevet EP3943598A1).

### Financement

Projet ANR FUNTASTIC - Financement ANR PRCI (Projet de Recherche Collaboratif International) avec le Canada (NSERC) - ANR-17-CE07-0047. Thèse CIFRE David Ribeaucourt - Financement ANRT 2017/1169.

### Contacts

Jean-Guy Berrin, David Ribeaucourt, Bastien Bissaro et Mickaël Lafond

#### UMR BBF

[jean-guy.berrin@inrae.fr](mailto:jean-guy.berrin@inrae.fr)

[david.ribeaucourt@inrae.fr](mailto:david.ribeaucourt@inrae.fr)

[bastien.bissaro@inrae.fr](mailto:bastien.bissaro@inrae.fr)

[mickael.lafond@univ-amu.fr](mailto:mickael.lafond@univ-amu.fr)



### Contexte

L'industrie des arômes et parfums fait face à de nombreux défis : (i) la complexité du contexte international et la volatilité conséquente du cours des matières premières et de leur qualité ; (ii) la nécessité de diminuer son impact sur la biodiversité ; (iii) une demande croissante en produits naturels et durables ; (iv) le maintien de prix abordables pour le consommateur. Les voies de synthèse chimique traditionnelles et d'extraction végétale s'avèrent insuffisantes pour répondre à ces enjeux. Les biotechnologies présentent l'une des alternatives les plus prometteuses mais nécessitent le développement de nouvelles voies biocatalytiques. Suite à la découverte récente d'un nouveau sous-groupe d'enzymes fongiques (Alcool Oxydases), des travaux ont été entrepris pour mieux comprendre ces biocatalyseurs et évaluer leur potentiel dans le cadre de l'oxydation d'alcools gras primaires.

### Résultats

Les travaux combinant études enzymologiques et modélisation dynamique menés en collaboration avec le CNRS, l'université de Colombie Britannique (Canada), le Barcelona Supercomputing Center (Espagne) et l'entreprise V. Mane Fils (France), ont permis d'établir la capacité d'une métallo-enzyme fongique issue du champignon phytopathogène *Colletotrichum graminicola* à convertir des alcools gras en aldéhydes fragants

(en particulier l'octanal) aux notes d'agrumes. Ces travaux ont permis une meilleure compréhension et maîtrise du système enzymatique, révélant notamment la capacité sur-oxydative de l'enzyme, ainsi qu'un phénomène d'inhibition médié par certains aldéhydes hydratés. Les connaissances acquises ont permis l'exploitation de cette enzyme dans une seconde application : une cascade enzymatique permettant la conversion énantiosélective du géraniol en (*R*)-citronellal, un intermédiaire clé dans la synthèse du menthol, en collaboration avec des chercheurs de Delft (Pays Bas).

Ces travaux illustrent le potentiel des catalyseurs enzymatiques pour la production d'aldéhydes longues chaînes pour l'industrie des arômes et des parfums.

### Perspectives

Les résultats confirment le potentiel de cette famille enzymatique atypique. Outre les applications dans le domaine de la parfumerie, ces enzymes se positionnent comme un nouvel outil biocatalytique pour la mise au point de voies de synthèse enzymatiques ou chemo-enzymatiques. Leur exploitation à échelle commerciale nécessite néanmoins l'élucidation plus approfondie du mécanisme d'activation des CRO et leur adaptation à des contraintes industrielles, via notamment des méthodes d'immobilisation et/ou d'évolution dirigée.

## Quels impacts du traitement des micropolluants contenus dans les eaux usées ?



### En savoir plus

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150300>

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157593>

### Partenariat

- INRAE-ITAP, ELSA, Research group for environmental life cycle and sustainability assessment, Montpellier, France
- European Commission, Joint Research Centre, Ispra, Italy
- Agence de l'eau RMC, OFB, Suez-Environnement, LGC Toulouse, université de Bordeaux, RiverLy-LAMA

### Contact

Jean-Marc Choubert

UR REVERSAAL

[jean-marc.choubert@inrae.fr](mailto:jean-marc.choubert@inrae.fr)



### Contexte

Depuis de nombreuses années, les politiques publiques françaises incitent à la sobriété chimique (réduction à la source, substitution) du traitement de l'eau. En France, plusieurs projets de recherche emblématiques ont documenté les performances de différentes techniques d'élimination des micropolluants et leurs marges d'optimisation, à savoir l'ozonation, le charbon actif (grain ou poudre) ou l'osmose inverse.

Le coût environnemental et financier du déploiement de telles technologies en Europe n'a jamais été évalué. Ce travail analyse l'impact de différents scénarios de traitement des micropolluants par ozonation ou adsorption sur charbon actif sur différents critères. Il évalue le bénéfice global pour éclairer le décideur public à exiger (ou pas) des solutions curatives.

### Résultats

Une analyse de cycle de vie a été réalisée avec le logiciel USEtox en incluant les concentrations et l'efficacité d'élimination de 65 micropolluants de différentes familles, ainsi que leur (éco)toxicité potentielle. Du point de vue des écosystèmes aquatiques, l'impact des technologies au charbon actif ou d'ozonation à l'air sont équivalentes tandis que l'impact de l'ozonation à l'oxygène pur semble très important. Du point de vue de la santé, le traitement par ozonation à l'air est le meilleur choix, suivi du charbon actif (pénalisé par la production du charbon), puis de

l'ozonation à l'oxygène pur (pénalisé par la consommation d'oxygène). L'amélioration locale résultant du rejet d'effluents de meilleure qualité est cependant compensée par l'augmentation de la toxicité indirecte engendrée par la consommation d'électricité et de réactifs.

L'implantation d'ozonation ou de charbon actif, seuls ou en combinaison, permettrait de réduire de 75 % la pollution chimique émise vers les milieux aquatiques, pour un coût d'environ 4 milliards €/an si on équipait toutes les stations d'épuration en Europe.

Si l'on équipait les installations de plus 10 000 équivalent-habitant (EH) rejetant leurs eaux dans un cours d'eau dont le taux de dilution est inférieur à 10 cela réduirait de 50 % le flux de substances chimiques rejetées. Cette stratégie induirait une augmentation des émissions de gaz à effet de serre de +0,15 %, compensables par l'utilisation d'électricité décarbonée et des charbons actifs à bas niveau de carbone (ex. biochar issu de l'économie circulaire).

### Perspectives

Les produits de transformation des micropolluants générés lors des traitements sont en cours d'étude (projet ANR TRANSPRO). En termes d'analyse du cycle de vie, l'enjeu consiste à intégrer plus de molécules organiques, ainsi que les produits de transformation afférents.



©Adobe Stock- Belyaaa  
L'alimentation représente environ 1/4 des impacts environnementaux en Europe

## Les propriétés des aliments ont leur jumeau numérique



### En savoir plus

Vitrac O. et al.

In Silico Prediction of Food Properties: A Multiscale Perspective

Frontiers in Chemical Engineering . 2022

<https://doi.org/10.3389/fceng.2021.786879>

### Valorisation

Une valorisation internationale des concepts et des enjeux des méthodes CAFE a été publiée dans Nature Food, avec une participation du groupe PepsiCo pour justifier son applicabilité à l'échelle industrielle.

### Contact

Olivier Vitrac

UMR SAYFOOD

[olivier.vitrac@agroparistech.fr](mailto:olivier.vitrac@agroparistech.fr)



### Contexte

Les aliments sont des objets techniques d'une extrême complexité de leur fabrication à leur déconstruction dans le tube digestif. Ils obéissent aux propriétés de la matière molle, ni liquide, ni solide. Ils ont une origine biologique et sont donc variables. Pour toutes ces raisons, la conception d'aliments par ordinateur est bien moins développée que les autres méthodes de conception manufacturière (CAM), qui utilisent la modélisation physique et mathématique. Les mêmes outils CAM pourraient être utilisés pour les aliments si leurs propriétés étaient plus disponibles et aisément tabulées. Les travaux visent à profiter des puissances de calcul et des nouveaux algorithmes pour calculer les propriétés manquantes des aliments à partir de leurs structures et compositions microscopiques.

### Résultats

La faisabilité de la modélisation hiérarchique des propriétés des aliments, des molécules jusqu'à l'aliment en passant par la microstructure, a été démontrée pour les propriétés de transfert de matière. Ces propriétés contrôlent des propriétés aussi diverses que le séchage, la prise d'huile et le transfert de contaminants. L'espace et le temps doivent être pris en compte aux échelles clés avec des

techniques d'extrapolation adaptées. L'homogénéisation spatiale permet de décrire les effets d'organisation des phases et la présence de la structure cellulaire. L'homogénéisation temporelle est une technique relativement nouvelle qui permet de capturer les effets thermodynamiques liés à la composition locale. Le schéma global calcule les propriétés de l'aliment à partir de deux limites, la limite thermodynamique et la limite des milieux continus. Elles séparent trois domaines de calcul complémentaires. Le premier domaine couvre la description moléculaire des aliments ; le second traite de l'organisation et la structuration de la matière (émulsions, mousses...); le troisième domaine est quasi- continu et peut-être traité à l'aide des outils CAM.

### Perspectives

Les aller et retour sont possibles entre les trois domaines. Il est ainsi possible de construire des jumeaux numériques des aliments à des stades différents de leur transformation ou digestion. L'approche permettra d'accélérer la convergence de « one food » vers « one health » en imaginant la composition et la structure de l'aliment qui réalise l'effet désiré. Des travaux complémentaires sont en cours pour valider ces principes à partir d'observations en temps réel sous microscope.



©Adobe Stock- Stanislaw Mikulski

## Une large gamme d'applications pour le simulateur de mastication



### En savoir plus

- [https:// DOI 10.4000/bmsap.10052](https://doi.org/10.4000/bmsap.10052)
- <https://doi.org/10.3390/molecules27103259>

### Valorisation

Ce dispositif peut être utilisé pour des applications alimentaires (homme et animal), pharmaceutiques, en particulier pour des objectifs de reformulation, mais aussi pour des applications plus larges touchant les SHS, en relation avec la mastication.

### Partenariat

- Institute of Food Sciences & Technologies, Japan
- PALEVOPRIM UMR 7262, Laboratoire Paléontologie Evolution Paléoécosystèmes Paléoprimatologie, CNRS, Université de Poitiers
- INRAE, UR BIA, F-44316, Nantes, France
- Plateforme Technologique du Creusot France
- Chemosens, CSGA, Dijon



### Contact

Christian Salles  
UMR CSGA  
[christian.salles@inrae.fr](mailto:christian.salles@inrae.fr)



### Contexte

Pendant la phase orale, les aliments sont progressivement dégradés sous l'effet conjoint de la mastication et de la salivation. Cela a pour conséquence la libération progressive des composés de la saveur en bouche qui deviennent disponibles pour interagir avec les récepteurs olfactifs et gustatifs, induisant la perception. Ce phénomène dépend de la composition et de la texture des aliments, des paramètres oraux (salive, mastication en particulier) ainsi que des propriétés physico-chimiques des composés libérés. Afin de contrôler les paramètres oraux et surmonter les limitations des expérimentations conduites *in vivo*, un simulateur de mastication performant qui prend en compte de manière précise les principaux paramètres oraux a été développé. Ce dispositif permet une large palette d'applications dont trois exemples représentatifs sont présentés ci-dessous.

### Résultats

Une étude sur la libération de composés d'arôme dans des conditions de mastication a été menée *in vitro* à partir de matrices lipoprotéiques aromatisées. En découplant les différentes fonctions orales, l'influence de chaque paramètre oral sur la libération des composés a pu être évaluée grâce à un couplage direct entre le simulateur et un spectromètre de masse. Ainsi, différentes interactions observées peuvent être expliquées par des différences de propriétés physico-chimiques des composés volatils libérés

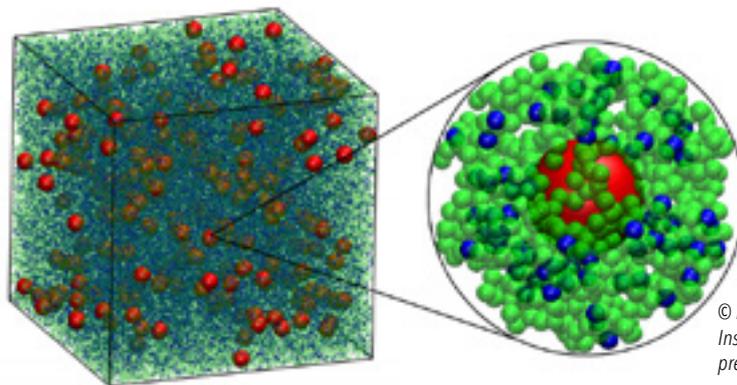
et les paramètres oraux qui influencent différemment la libération des composés aromatiques selon leurs caractéristiques physico-chimiques. Un suivi de la libération de sel au cours du temps a pu être réalisé avec ce type de matrices par analyse d'échantillons de salive prélevée (conductimétrie ou HPLC).

Une approche *in vitro* avec des conditions contrôlées de mastication nous a permis de proposer un modèle phénoménologique de la mastication d'extrudés à base de farine de pois d'une grande variété de textures et de morphologies en mettant en relation la viscosité des bols avec sa fragmentation et sa teneur en eau. Le modèle prend en compte des propriétés fonctionnelles des extrudés telles que la texture et la solubilité des protéines.

Une collaboration avec des paléanthropologues nous a conduit à équiper le simulateur de mastication de mâchoires de différents primates fossiles réalisées par impression 3D et tester la mastication de différents types d'aliments : pommes, gingembre, grillons, feuilles, noisettes. Nous avons en particulier observé une relation entre les adaptations morphologiques des dents et les régimes alimentaires des espèces de primates.

### Perspectives

L'utilisation du prototype de deuxième génération équipé d'une motorisation performante, d'une langue plus réaliste avec membrane interchangeable et d'un capteur de force intégré dans le palais permettra d'élargir encore son champ d'application.



© <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.1c01394>  
Instantané d'une simulation de gel de polymères en présence de particules

## Dynamique de nanoparticules en milieu confiné : ce que nous apprennent les simulations



### En savoir plus

Sorichetti V. *et al.*

Dynamics of Nanoparticles in Polydisperse Polymer Networks: from Free Diffusion to Hopping

Macromolecules . 2021

<https://doi.org/10.1021/acs.macromol.1c01394>

### Partenariat

- Laboratoire Charles Coulomb, Montpellier
- Financement : Département Transform et Labex Numev
- Meso@LR, centre de calcul régional

### Contact

Virginie Hugouvieux

UMR IATE

[virginie.hugouvieux@inrae.fr](mailto:virginie.hugouvieux@inrae.fr)



### Contexte

Vous êtes-vous déjà promené dans un labyrinthe dont les parois sont déformables ? Un labyrinthe dans lequel les passages, certains très larges et d'autres très étroits, peuvent s'ouvrir puis se refermer ? C'est l'expérience que fait, à une échelle microscopique, une particule qui diffuse dans certains matériaux hétérogènes tels que les aliments ou la biomasse végétale. Comprendre ce qui pilote la dynamique de ces particules dans des structures désordonnées et déformables est une question importante car elle a des conséquences dans différents domaines : diffusion de molécules dans des matériaux à base de biopolymères, stabilité de matériaux composites, suivi de marqueurs fluorescents. Afin d'explorer la dynamique de nanoparticules dans ces milieux complexes, une approche numérique a été utilisée : des gels de polymères constitués de mailles plus ou moins grandes et déformables ont été simulés en présence de nanoparticules de tailles variées.

### Résultats

Les simulations de dynamique moléculaire décrivent le comportement de gels de polymères en présence de nanoparticules et donnent accès à une gamme très étendue de tailles des nanoparticules et des mailles des gels. Cela permet de faire fortement varier le confinement, d'un gel dilué

contenant de petites particules à un gel concentré chargé en grosses particules. Les simulations permettent de calculer des propriétés collectives des polymères et des particules, telles que des distributions de tailles de mailles ou des coefficients de diffusion. Cette approche nous a permis de démontrer que le paramètre de confinement, défini comme le ratio entre la taille des nanoparticules et la taille moyenne des mailles du gel, pilote la dynamique des particules. La diffusion est libre pour un faible confinement, lorsque de petites particules sont dispersées dans un gel peu concentré. Lorsque le confinement augmente, on observe une chute drastique du coefficient de diffusion, et pour des confinements élevés ou extrêmes (pour des particules dont la taille est supérieure à la taille moyenne des mailles du réseau), les particules présentent une dynamique par sauts – elles peuvent s'échapper d'une maille trop petite si celle-ci se déforme suffisamment.

### Perspectives

Ces travaux mettent à jour un paramètre clé pour la diffusion de particules dans des gels. C'est une première étape vers l'étude de matériaux contenant des molécules qui diffusent dans le milieu tout en le modifiant. De tels phénomènes sont observés lors de la structuration ou de la dégradation de biopolymères par des enzymes.



© AdobeStock - Monticello

## Prédiction de la solubilité du CO<sub>2</sub> dans les aliments en vue de leur conditionnement sous atmosphère modifiée



### En savoir plus

Munch M. *et al.*

Composition-based statistical model for predicting CO<sub>2</sub> solubility in modified atmosphere packaging application

Journal of Food Engineering . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111283>

### Partenariat

- Institut technique Adria
- Projet OPTIMAP
- Projet Horizon 2020 GLOPACK (773375).

### Contacts

Patrice Buche, Valérie Guillard et Mélanie Münch

UMR IATE

[patrice.buche@inrae.fr](mailto:patrice.buche@inrae.fr)

[valerie.guillard@umontpellier.fr](mailto:valerie.guillard@umontpellier.fr)

[melanie.munch@u-bordeaux.fr](mailto:melanie.munch@u-bordeaux.fr)

### Contexte

Dans les applications d'emballages alimentaires sous atmosphère modifiée, un mélange d'O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> et de N<sub>2</sub> est généralement utilisé afin de prévenir la dégradation des aliments. L'intérêt du CO<sub>2</sub> est son effet bactériostatique, dépendant de sa concentration dans l'espace de tête de l'emballage. Le CO<sub>2</sub> a tendance à se solubiliser dans l'aliment entraînant une diminution de sa concentration dans l'espace de tête et une efficacité moindre. La connaissance de la solubilité du CO<sub>2</sub> dans un aliment donné est donc essentielle afin de prédire la quantité dissoute dans l'aliment et ainsi l'effet inhibiteur de la croissance microbienne, garantissant au mieux la conservation du produit. Néanmoins, les protocoles expérimentaux d'évaluation sont longs et coûteux ; et il n'existe à l'heure actuelle dans la littérature aucun modèle général permettant sa prédiction simple à partir d'informations sur l'aliment considéré, seuls des modèles partiels (pour certains types d'aliments ou compositions particulières) ayant été définis.

### Résultats

Ce travail met en valeur deux apports : (1) la constitution d'une base de connaissances structurée par ontologie à partir de mesures hétérogènes préexistantes issue de la littérature ou de tables de compositions (telles que l'ANSES-CIQUAL) et (2) l'apprentissage automatique de modèles prédictifs. L'intérêt d'une approche par l'intelligence artificielle

est double : elle permet d'une part un apprentissage simplifié du modèle, qui s'adapte aux données fournies ; d'autre part, l'introduction de connaissances expertes lors de sa définition permet une interprétation simplifiée, offrant ainsi un modèle prédictif explicatif, qui lie les caractéristiques des aliments avec leur impact sur la solubilité finale du CO<sub>2</sub>. Ces deux aspects, prédiction et explication, ont pu être validés à la fois par la littérature existante (en comparant avec des modèles partiels existants), mais également par le biais d'expériences menées sur quatre aliments types non compris dans la base d'apprentissage (jambon, saumon, fromage et pâté). L'outil MAP'OPT a été utilisé et à partir des solubilités prédites par le modèle d'apprentissage, il a été capable de prédire de façon précise l'évolution de la composition en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère intra-emballage.

### Perspectives

Outre l'enrichissement de la base de connaissances, ces résultats démontrent l'efficacité d'une approche guidée par l'intelligence artificielle. Cette approche pourrait être appliquée à d'autres paramètres clés comme la solubilité à l'O<sub>2</sub> ou les perméabilités au gaz (O<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub>). Ces nouveaux modèles permettant la prédiction de la perméabilité à l'O<sub>2</sub> et au CO<sub>2</sub> à partir des données de compositions des matériaux (multicouches, composites, etc.) alimenteraient l'outil MAP'OPT et étendraient ses possibilités de prédiction à de nouveaux aliments et de nouveaux matériaux d'emballages innovants tels que des emballages bio-composites.



## Partie 2

# Construire la qualité des aliments et des systèmes alimentaires



© Maheshchandra Patil

La durabilité est une qualité des aliments de plus en plus considérée. Déterminer les impacts environnementaux des aliments par l'analyse du cycle de vie est une approche nouvelle pour réduire ces impacts. Préciser les relations propriétés-fonctionnalités est déterminant pour construire et comprendre les qualités nutritionnelles et sensorielles des aliments.

Construire des systèmes alimentaires sobres et efficaces est une priorité. Elle concerne le procédé lui-même et son impact énergétique. Les travaux présentés tiennent également compte de la préservation et la conservation des aliments après récolte, tels que les agrumes ou la salade.



©Adobe Stock- Belyaaa  
L'alimentation représente environ 1/4 des impacts environnementaux en Europe

## Importance de la variabilité des impacts environnementaux au sein d'une même catégorie d'aliments



### En savoir plus

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130128>  
<https://doi.org/10.3390/su14159484>

### Partenariat

Ce travail a été réalisé uniquement sur fonds publics :

- thèse d'Adeline Cortesi financée pour moitié par le département TRANSFORM et pour moitié par l'école doctorale ABIES (2019-2022) ;
- métaprogramme Did'It de l'INRA (2016-2019) ;
- projet ANR DataSusFood (2020-2022).

### Contacts

Caroline Pénicaud, Gwenola Yannou-Le Bris et Adeline Cortesi

#### UMR SAYFOOD

[caroline.penicaud@inrae.fr](mailto:caroline.penicaud@inrae.fr)

[gwenola.yannou-lebris@agroparistech.fr](mailto:gwenola.yannou-lebris@agroparistech.fr)

[adeline.cortesi@inrae.fr](mailto:adeline.cortesi@inrae.fr)



### Contexte

L'alimentation humaine est responsable d'importants impacts environnementaux. Il est donc primordial de les étudier afin d'identifier les solutions permettant de les réduire.

Il est bien documenté que différentes catégories de produits peuvent avoir des impacts environnementaux très différents. Cela soutient l'idée d'une nécessaire transition des régimes alimentaires en remplaçant la consommation de certaines catégories de produits très impactantes (ex : produits animaux) par d'autres qui le sont moins (ex : légumineuses).

Cependant, nous disposons de très peu d'éléments pour savoir ce qu'il en est au sein d'une même catégorie de produits. L'enjeu est alors de savoir si la variabilité des impacts environnementaux intra-catégorie de produits est suffisamment importante pour (i) impliquer un bénéfice à la substitution d'un produit par un autre de la même catégorie mais qui aurait des impacts environnementaux moindres et (ii) mettre en place des stratégies pertinentes d'écoconception des aliments.

### Résultats

Deux catégories de produits ont été étudiées : 44 fromages AOP artisanaux français (produits issus de la transformation d'un ingrédient principal) et 80 pizzas industrielles représentatives du marché français (produits issus de l'assemblage de nombreux ingrédients).

Aussi bien pour les fromages

que pour les pizzas, les impacts environnementaux quantifiés par analyse du cycle de vie peuvent être très variables au sein même de la catégorie.

Par exemple, selon l'indicateur environnemental étudié, le fromage à l'impact le plus fort peut avoir jusqu'à 15 fois plus d'importance que celui à l'impact le plus faible. Substituer la consommation de la pizza la plus impactante sur l'environnement par celle la moins impactante conduirait à une réduction individuelle annuelle de 2,6 % des émissions de gaz à effet de serre liées à l'alimentation pour un consommateur français moyen de pizzas, ce qui est non négligeable.

Par ailleurs, les principaux leviers d'amélioration environnementale ont été identifiés comme étant le choix et la quantité d'ingrédients utilisés, dans les deux cas. Cependant, actionner ces leviers peut entrer en contradiction avec des objectifs nutritionnels. Une démarche d'écoconception doit donc se placer dans une approche multicritère couplant à minima environnement et nutrition.

### Perspectives

Puisque mener des actions d'écoconception à l'échelle du produit peut s'avérer très bénéfique, il sera important de développer des méthodes et outils d'écoconception permettant de coupler environnement et nutrition, et même plus largement environnement et autres qualités des produits, notamment la qualité sensorielle qui reste le critère de choix privilégié par les consommateurs.

## Lumière sur la couleur des vins rosés



### En savoir plus

Leborgne C. *et al.*

Elucidating the Color of Rosé Wines Using Polyphenol-Targeted Metabolomics  
Molecules . 2022

<https://doi.org/10.3390/molecules27041359>

### Partenariat

- Centre de recherche et d'expérimentation sur le vin Rosé (Vidauban, 83)
- IFV, Institut Français de la Vigne et du Vin (Grau du Roi, 30)
- UMT Qualinnov (Gruissan, 11)
- INRAE UMR SPO
- Infrastructure de Recherche PROBE - Plateforme Polyphénols (PFP)



### Contacts

Cécile Leborgne, Jean-Roch Mouret et Jean Claude Boulet

UMR SPO et UE PR

[cecile.leborgne@inrae.fr](mailto:cecile.leborgne@inrae.fr)

[jean-roch.mouret@inrae.fr](mailto:jean-roch.mouret@inrae.fr)

[jean-claude.boulet@inrae.fr](mailto:jean-claude.boulet@inrae.fr)



### Contexte

Depuis une vingtaine d'années, la consommation de rosés ne cesse d'augmenter, prenant une part croissante dans la production de nombreuses régions viticoles. Contrairement aux vins rouges et blancs, les vins rosés sont conditionnés en bouteilles transparentes permettant l'appréciation de leur couleur par le consommateur. Cette couleur couvre une large palette caractéristique des différents styles et constitue un élément clé de leur positionnement marketing. Il est donc essentiel de mieux comprendre la composition en pigments et ses déterminants, afin de mieux maîtriser la couleur des vins rosés et son évolution.

L'objectif de l'étude, menée en collaboration avec l'Institut Français de la vigne et du vin, Centre du Rosé et UMT Qualinnov, était d'explorer la composition phénolique d'une collection de vins rosés commerciaux présentant une large diversité de couleurs, afin d'apporter des éléments d'explication sur la couleur et la nature des pigments mis en jeu dans les différents styles de vins.

### Résultats

Une approche métabolomique ciblée utilisant la chromatographie liquide à ultra-haute performance couplée à la spectrométrie de masse a permis de quantifier 125 composés phénoliques dans 268 vins rosés commerciaux issus de la collection « Rosés du monde » constituée par l'Union des Œnologues de France pour le concours "Mondial du Rosé®". En parallèle, les caractéristiques

colorimétriques ont été obtenues par spectrophotométrie et calcul des trois paramètres CIELab ( $L^*a^*b^*$ ), définissant la couleur d'un vin dans un espace chromatique tridimensionnel. L'analyse chimométrique de ces données a montré que, bien que l'intensité de la couleur soit principalement déterminée par l'extraction des polyphénols, notamment les anthocyanes et les flavanols (ou tanins) du raisin, les différents styles de couleur correspondent à des compositions pigmentaires différentes.

La teinte saumonée des vins rosés clairs est principalement due aux pyranoanthocyanes qui résultent de la réaction des anthocyanes avec les acides phénoliques et l'acide pyruvique, sans lien apparent avec des phénomènes d'extraction. Au contraire, la couleur rouge des vins rosés foncés est liée aux produits des réactions des anthocyanes avec les flavanols, des composés soumis à des phénomènes d'extraction tandis que leur nuance jaune est associée à des pigments résultant de réactions des anthocyanes avec l'acétaldéhyde formé par oxydation de l'éthanol.

### Perspectives

Les travaux se poursuivent pour tenter d'identifier les facteurs qui régissent couleur et composition phénolique et en particulier de déterminer l'impact de la matière première et des opérations de vinification, notamment fermentation et collage protéique, sur les différents profils mis en évidence.



© Adobe Stock - Unclesam

## La spectrométrie de mobilité ionique : une 4<sup>ème</sup> dimension analytique pour caractériser les tannins du raisin



### En savoir plus

De Sousa Dias A.L. *et al.*

Improved Analysis of Isomeric Polyphenol Dimers Using the 4th Dimension of Trapped Ion Mobility Spectrometry–Mass Spectrometry

Molecules . 2022

<https://doi.org/10.3390/molecules27134176>

### Partenariat

Dans le cadre des Plateformes Régionales de Recherche et d'Innovation (PRRI) de la région Occitanie, ce travail de recherche a été financé par le projet PhenoVal (FEDER, Région Occitanie Pyrénées-Méditerranée, Groupe Grap'Sud).



### Contacts

Nicolas Sommerer et Cédric Saucier

UMR SPO

[nicolas.sommerer@inrae.fr](mailto:nicolas.sommerer@inrae.fr)

[cedric.saucier@umontpellier.fr](mailto:cedric.saucier@umontpellier.fr)



### Contexte

La compréhension de la qualité des matières premières et des produits finis implique la connaissance des composés marqueurs qui informent sur le potentiel de transformation des matières premières et la qualité du produit fini. Certains composés phénoliques de la famille des flavanols, appelés déhydrodicatéchines, sont des petits tannins faisant partie des marqueurs de la qualité du raisin et du vin, mais aussi d'autres produits fermentés, comme la fève de cacao et le chocolat.

La détection et l'identification de certaines déhydrodicatéchines sont difficiles, voire impossibles dans certains cas, à partir des techniques classiques, comme la spectrométrie de masse couplée à la chromatographie liquide LC-MS/MS. En effet, ils sont souvent coélus chromatographiquement, inséparables en spectrométrie de masse car isomères, et présentent les mêmes ions fragments en MS/MS avec de simples variations d'intensité relative des ions fragments. Nous avons développé une méthode basée sur la nouvelle dimension de mobilité ionique (IMS) afin de séparer les déhydrodicatéchines isomères. En effet, la plate-forme d'analyse des polyphénols (PFP) a acquis récemment un nouveau spectromètre de masse à haute résolution, équipé d'un module de spectrométrie de mobilité ionique (UHPLC-IMS-QTOF-MS/MS) dédié aux analyses des familles d'isomères dans

les matrices alimentaires complexes.

### Résultats

La méthode UHPLC-tims-TOF mise au point dans ce travail a permis de détecter une cinquantaine de déhydrodicatéchines à partir de solutions modèles. Pour certaines d'entre elles, la détection n'a été possible que grâce à la technique de mobilité ionique, ce qui a démontré l'apport de cette technique en complément des spectrométries de masse à haute résolution (HRMS) et MS/MS. En nous appuyant sur les comportements caractéristiques de ces 50 déhydrodicatéchines dans les 4 dimensions chromatographiques, nous avons identifié 17 déhydrodicatéchines dans un extrait de pépins de raisins arrivés à maturité. Ces petits tannins, biosynthétisés *in planta*, ont pour la première fois ainsi été détectés par mobilité ionique.

### Perspectives

La section efficace de collision, valeur mesurée en IMS, est une grandeur physique intrinsèque à chaque molécule. Cette propriété rend cette méthode d'analyse des déhydrodicatéchines directement adaptable à la caractérisation des déhydrodicatéchines dans d'autres aliments et produits naturels comme le thé vert et noir, le chocolat, la bière, etc. Les déhydrodicatéchines analysées avec cette méthode deviendront des marqueurs plus précis de la qualité des produits finis.



© Mehdi Cherkaoui  
Système nanoLC-MS/MS  
(U3000 RSLC et QExactive  
HF)

# Analyser finement les changements structuraux de l'ovalbumine à la cuisson et leur influence sur l'allergie à l'œuf



## En savoir plus

Cherkaoui M. *et al.*

High-resolution mass spectrometry unveils the molecular changes of ovalbumin induced by heating and their influence on IgE binding capacity

Food Chemistry . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133624>

## Partenariat



## Contacts

Mehdi Cherkaoui, Wieneke Dijk, Dominique Tessier, Colette Larre, Chantal Brossard et Hélène Rogniaux

### UR BIA

[mehdi.cherkaoui@inrae.fr](mailto:mehdi.cherkaoui@inrae.fr)

[wieneke.dijk@inrae.fr](mailto:wieneke.dijk@inrae.fr)

[dominique.tessier@inrae.fr](mailto:dominique.tessier@inrae.fr)

[colette.larre@inrae.fr](mailto:colette.larre@inrae.fr)

[chantal.brossard@inrae.fr](mailto:chantal.brossard@inrae.fr)

[helene.rogniaux@inrae.fr](mailto:helene.rogniaux@inrae.fr)



## Contexte

L'allergie alimentaire est un problème de santé publique qui augmente depuis plusieurs années dans les pays industrialisés. L'allergie à l'œuf est l'une des allergies pédiatriques les plus courantes puisqu'elle touche 1,3-1,6 % des enfants et se développe généralement dans la première année de vie. Un des allergènes responsables de cette allergie est l'ovalbumine qui est la protéine majoritaire contenue dans le blanc d'œuf. Plusieurs études ont mis en évidence que 50 à 85 % des patients allergiques à l'œuf pouvaient tolérer des œufs cuits suggérant un lien entre les modifications structurales des allergènes de l'œuf induites par le chauffage et leur allergénicité. Cependant, très peu de données permettant d'expliquer ce lien à une échelle moléculaire sont disponibles dans la littérature.

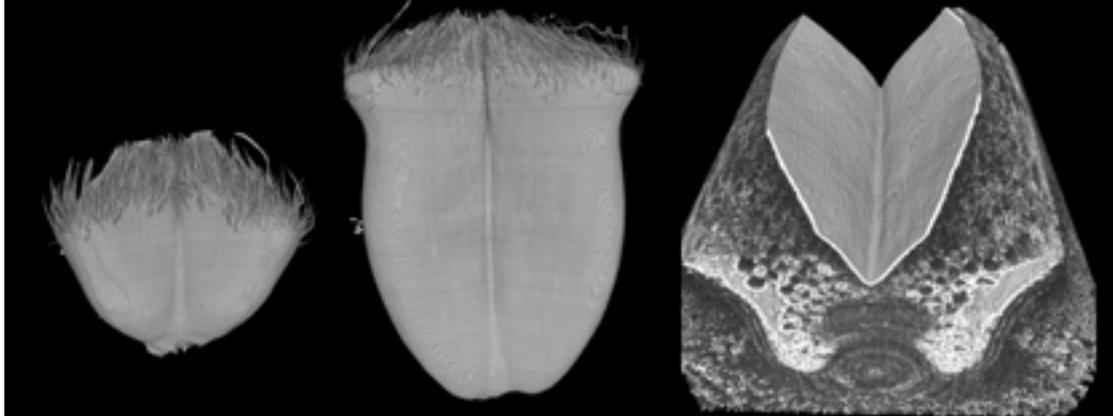
## Résultats

Notre analyse a permis dans un premier temps de confirmer l'impact du chauffage sur la structure de l'ovalbumine. Dans un second temps, notre analyse a conduit à l'identification et la localisation des zones de pontages (agrégation) et de glycation de l'ovalbumine et ainsi de caractériser les changements

structuraux subis par celle-ci. Nous avons pu observer que les « points chauds » de ces zones – c'est-à-dire les acides aminés les plus fréquemment impliqués dans des modifications de type pontage ou glycation – sont situés à forte proximité d'épitopes linéaires reconnus par les anticorps des patients allergiques. Notamment, ces changements structuraux interviennent de façon majeure au niveau de la partie C-terminale de la protéine, où un épitope très réactif est situé. Ce travail apporte des nouveaux éléments de compréhension à l'échelle moléculaire permettant d'établir de manière formelle le lien entre les modifications structurales de l'ovalbumine suite à son chauffage et la baisse d'allergénicité de celle-ci.

## Perspectives

Pour capitaliser ce travail réalisé sur un modèle simplifié (ovalbumine purifiée) et confirmer les résultats en conditions « réelles », des analyses de produits alimentaires cuits, préparés à base d'œuf, seront effectuées dans les prochains mois selon la méthodologie employée dans cette analyse. L'amélioration des outils bio-informatiques engagée dans le cadre du projet DeepProt permettra de mener à bien ces analyses de manière exhaustive à un haut niveau de détail.



© David Legland- Visualisations 3D d'images de grains obtenues à deux échelles ; la première (à gauche et au centre) montre la forme globale des grains en 3D ; la deuxième (à droite) permet d'identifier les tissus et d'accéder à la morphologie de certaines cellules

## La morphologie cellulaire du grain de blé en 3D



### En savoir plus

Legland D. *et al.*

Synchrotron Based X-ray  
Microtomography Reveals Cellular  
Morphological Features of Developing  
Wheat Grain

Applied Sciences . 2022

<https://doi.org/10.3390/app12073454>

### Partenariat

- GDEC et PIAF (Clermont-Ferrand)
- Synchrotron SOLEIL.

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la thèse de Thang Duong Quoc Le, cofinancée par le département TRANSFORM et la région Pays-de-la-Loire



### Contacts

David Legland, Anne-Laure Chateigner-Boutin et Christine Girousse

UR BIA

[david.legland@inrae.fr](mailto:david.legland@inrae.fr)

[anne-laure.chateigner-boutin@inrae.fr](mailto:anne-laure.chateigner-boutin@inrae.fr)

[christine.girousse@inrae.fr](mailto:christine.girousse@inrae.fr)



### Contexte

Le blé est l'une des cultures les plus importantes au monde, principalement utilisée pour la consommation humaine et l'alimentation animale. Pour faire face à la demande croissante de production, dans un contexte de changement climatique, il est nécessaire de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans la croissance du grain.

La micro-tomographie à rayons X permet l'étude non destructive de l'architecture 3D des spécimens, ne nécessitant pas de coloration, de coupe ou d'inclusion. En particulier, la tomographie par contraste de phase obtenue grâce au rayonnement synchrotron produit des images plus contrastées et mieux résolues que celles obtenues avec des tomographes de laboratoire.

Le but de cette étude était d'évaluer le potentiel de la tomographie à contraste de phase pour étudier la mise en place des tissus dans le grain de blé en développement.

### Résultats

Des grains de blé à différents stades de développement ont été imagés sur la ligne Psiché du synchrotron SOLEIL. Deux échelles d'imagerie ont été explorées. La première permet d'obtenir des images en 3D de l'intégralité d'un grain. Le contraste et la résolution (3  $\mu\text{m}$ ) permettent d'identifier la forme globale du grain, de nombreux tissus, et de distinguer des espaces intercellulaires et certaines cellules.

Les changements de forme du grain sont clairement visibles. Une échelle plus fine (600 nm) permet de mieux révéler les tissus et leurs variations spatio-temporelles, et d'accéder à la morphologie 3D de certaines cellules. Cette étude a permis également de révéler de nouveaux détails anatomiques : la présence de stomates et de tissus à forte porosité dans la région ventrale supérieure du grain en croissance.

### Perspectives

La qualité des images permet d'envisager de suivre la mise en place des différents tissus avec une précision inégalée. En particulier, la quantification de la morphologie des cellules et des tissus permettrait de faire le lien avec la croissance des tissus. Pour améliorer la compréhension des phénomènes impliqués dans la croissance du grain, nous développons actuellement des outils adaptés à l'analyse quantitative d'images de grande volumétrie.

Il sera également nécessaire de coupler les informations morphologiques 3D avec des informations plus fines et plus spécifiques obtenues notamment par microscopie (fond clair, fluorescence, à force atomique), par imagerie par résonance magnétique nucléaire ou par spectrométrie de masse. A terme, la tomographie sera utilisée pour générer un modèle numérique en 3D du grain de blé, qui permettra de projeter les informations provenant des autres modalités.



© AdobeStock Luca Manieri

# Élaboration et comportement mécanique de composites à base de protéagineux



## En savoir plus

Jebalia I. *et al.*

Pulses based starch-protein composites: morphological, mechanical characterization and finite element modelling

Food Research International . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112047>

## Partenariat

- Région Pays de La Loire : Financement de la thèse d'Imen Jebalia (50%)
- Imperial College (Londres, UK) : Maria Charalambides & Samuel A. Humphry-Baker.

## Contacts

Magdalena Kristiawan, Guy Della Valle et Sofiane Guessasma

UR BIA

[magdalena.kristiawan@inrae.fr](mailto:magdalena.kristiawan@inrae.fr)

[guy.della-valle@inrae.fr](mailto:guy.della-valle@inrae.fr)

[sofiane.guessasma@inrae.fr](mailto:sofiane.guessasma@inrae.fr)



## Contexte

Les protéagineux (pois, lentilles, haricots ...) sont une excellente source de protéines. Ils peuvent contribuer à limiter l'impact environnemental associé à la consommation de protéines animales dans notre alimentation. La formulation de snacks expansés 100 % à base de protéagineux, est un moyen intéressant pour diversifier l'offre d'aliments à base de légumineuses. La texture de ces aliments est régie par la densité, la structure cellulaire et les propriétés mécaniques de la paroi cellulaire considérée comme un composite amidon-protéines. Dans ce contexte, le but de notre étude est de déterminer la relation entre les caractéristiques morphologiques et les propriétés mécaniques de ces composites amylo-protéiques, à base de pois, à l'état vitreux, en combinant des approches expérimentales et de modélisation numérique, à différentes échelles structurales.

## Résultats

Des composites à base de pois ont été élaborés par extrusion bi-vis co-rotative. Leurs caractéristiques morphologiques dépendent de la formulation et de l'énergie mécanique spécifique d'extrusion. Leurs propriétés mécaniques, déterminées à l'échelle macroscopique, varient en fonction de la fraction volumique des particules, de leurs caractéristiques morphologiques et de leurs propriétés mécaniques locales. Ces dernières ont été déterminées par des essais de nano-indentation, qui montrent que le module d'interphase varie, à teneur en eau constante, de 3 à 7 GPa.

En raison de la complexité du comportement mécanique de ces composites, et notamment du nombre de variables impliquées, nous avons déployé une approche de modélisation multi-échelle, basée sur la méthode des éléments finis (FEM), pour établir les lois constitutives des composites, en intégrant leur morphologie. À l'échelle microscopique, l'épaisseur et le module de l'interphase amidon-protéine sont prédits par la simulation du test de nano-indentation. L'essai de traction, à l'échelle macroscopique, peut alors être simulé, en intégrant la morphologie réelle et les paramètres de la loi constitutive, ainsi établie au cours des étapes précédentes. Cette loi constitutive a ensuite été validée par comparaison des résultats expérimentaux avec ceux issus de la modélisation. L'ensemble des résultats a mis en évidence le rôle important (i) du contraste entre les propriétés mécaniques des phases, et (ii) de la rigidité à l'interphase sur l'hétérogénéité des contraintes à l'interface. La modélisation FEM multi-échelles a permis de comprendre les mécanismes de déformation des composites amylo-protéiques. Elle a ouvert la voie à l'optimisation des propriétés mécaniques par la conception de morphologies des composites.

## Perspectives

L'intégration des lois constitutives des composites dans la modélisation FEM de la mécanique des solides alvéolaires fragiles permet de concevoir des aliments solides expansés, à base de légumineuses, à la texture désirée.

# Conception d'une émulsion biosourcée pour la conservation des agrumes



## En savoir plus

Salim D. *et al.*

Development of biobased emulsions for postharvest citrus fruit preservation

Sustainable Chemistry and Pharmacy . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100583>

## Valorisation

L'incubateur « Lebanon Science & Technology Park » (Tripoli, Liban) est chargé de réaliser la mise en œuvre de la formulation à l'échelle pilote et de tester son application sur les oranges à l'aide d'équipements adaptés au traitement post-récolte.

## Partenariat

- Laboratoire de Chimie et de Biotechnologies des produits naturels (Lab CHEMBIOPRO), Université de La Réunion
- Centre AZM pour la recherche et ses applications, Tripoli, Liban

## Contact

Pascale de Caro

UMR CAI

[pascale.decaro@toulouse-inp.fr](mailto:pascale.decaro@toulouse-inp.fr)

## Contexte

Les agrumes sont exposés au développement de moisissures principalement causées par le pathogène «*Penicillium digitatum*», générant des pertes post-récoltes importantes.

Le contexte sociétal et réglementaire évoluant, de nouvelles stratégies sont envisagées pour éviter l'utilisation des fongicides de synthèse et tendre vers des solutions plus respectueuses d'un point de vue sanitaire et environnemental.

Le présent travail vise à proposer une formulation phytosanitaire alternative utilisant des molécules actives issues de l'algue verte *Ulva lactuca*, associées à un nouveau tensio-actif biosourcé, pour améliorer la conservation des agrumes après récolte.

## Résultats

Les tests microbiologiques ont révélé des activités anti-fongiques intéressantes pour l'extrait d'algue verte, vis-à-vis de l'adhésion et de la germination du *Penicillium digitatum*.

Pour faciliter l'application de l'extrait aqueux, il est dispersé au sein d'une émulsion grâce à un tensio-actif biosourcé composé d'aconitates d'esters. Ces derniers sont préparés à partir de l'acide *trans*-aconitique présent dans les vinasses de canne

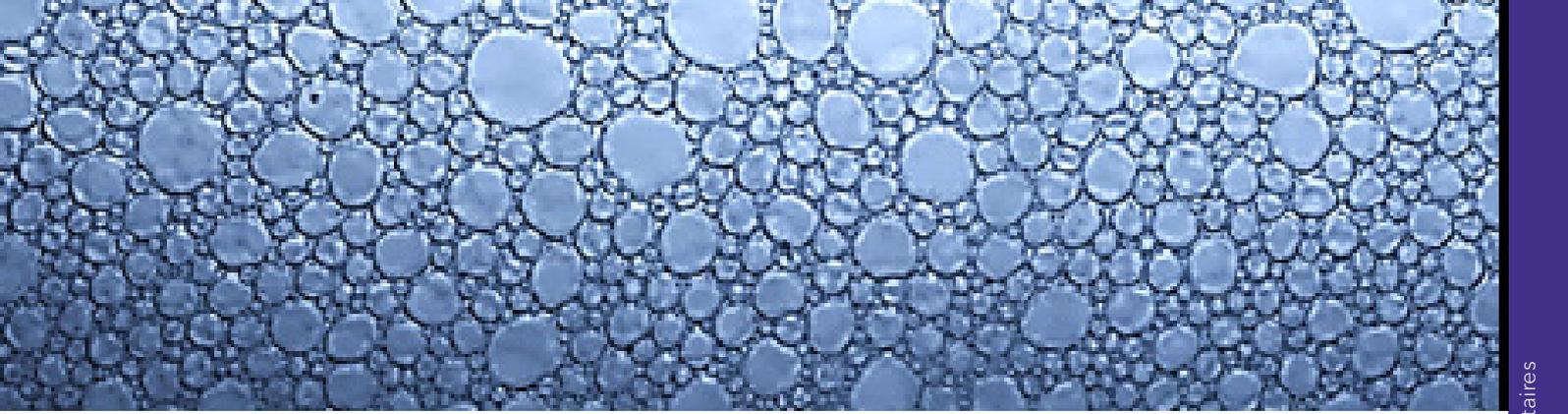
à sucre, grâce à un nouveau procédé de synthèse en chimie verte. Ces molécules amphiphiles capables de stabiliser l'émulsion contenant l'extrait d'algue, possèdent également des propriétés anti-fongiques vis-à-vis du *P. digitatum*. L'émulsion résultante présente ainsi une activité anti-fongique accrue, et forme un film adhérent à la surface des fruits.

Enfin, des tests *in vivo* réalisés sur des oranges « Valencia », ont montré que les émulsions permettent de réduire de façon importante le taux d'infection des oranges. Ainsi, 6 semaines après le traitement, 89 % des oranges sont saines, comparé à 22 % pour les oranges sans traitement. En conclusion, ces travaux proposent des ingrédients naturels et biosourcés élaborés par des procédés écocompatibles (extraction, synthèse, émulsion), pour une nouvelle approche en biocontrôle.

## Perspectives

Nous envisageons de mettre en œuvre un procédé d'encapsulation de l'extrait d'algue, à l'aide d'un isolat de protéine de soja (matériau d'enrobage), dans le but de préserver l'activité anti-fongique des molécules (notamment les ulvanes), avant leur formulation.





© T. Benezech - Mousse circulant à vitesse lente (1,5 cm/s), peu nettoyante

# Nettoyage de surfaces d'équipements par des mousses en écoulement



## En savoir plus

Dallagi H. *et al.*

Wet foam flow: A suitable method for improving surface hygiene in the food industry

Journal of Food Engineering . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.110976>

## Contacts

Thierry Benezech et Christine Faille

UMR UMET

[thierry.benezech@inrae.fr](mailto:thierry.benezech@inrae.fr)

[christine.faille@inrae.fr](mailto:christine.faille@inrae.fr)



## Contexte

Dans l'industrie agroalimentaire, la contamination microbiologique des surfaces des équipements peut entraîner une contamination croisée des produits traités, causant ainsi des problèmes économiques importants (rappels de produits, perte de confiance des consommateurs, gaspillage alimentaire), voire des problèmes de santé publique. Les processus de nettoyage et de désinfection couramment mis en œuvre pour garantir l'hygiène des équipements sont reconnus être à l'origine de consommations excessives d'eau, d'énergie et de produits chimiques. Dans ce contexte, pour la première fois, le nettoyage avec un flux de mousse est proposé comme une méthode alternative permettant d'améliorer l'efficacité du nettoyage en réduisant la consommation d'eau et d'énergie.

## Résultats

L'étude du nettoyage de surfaces en acier inoxydable a été menée avec de la mousse (SDS ; 50 % d'eau). Deux types de contaminations des surfaces, très résistantes au nettoyage, ont été étudiés : des gouttelettes contenant des spores de *B. subtilis* rendues hydrophiles et hydrophobes, ou des biofilms de trois souches de bactéries rencontrées fréquemment en industrie alimentaire (*E. coli*, *B. cereus*, et *P. fluorescens*). La comparaison avec un nettoyage en place (SDS et eau) montre une meilleure efficacité de la mousse qui serait liée au passage des bulles

au contact des parois contaminées induisant notamment des fluctuations de contraintes de cisaillement en fréquence et en amplitude. Il s'avère ainsi que la présence de bulles de petite taille (<0,2 mm) associée à des vitesses élevées améliore significativement l'efficacité du nettoyage de ces différents contaminants bactériens.

L'analyse du cycle de vie démontre que le nettoyage par de la mousse réduit de 7 fois la consommation d'eau, de 8 fois la consommation d'énergie tout en réduisant de 70 % la majorité des impacts environnementaux.

Enfin, la caractérisation expérimentale et numérique du comportement rhéologique de la mousse s'écoulant à l'intérieur de différentes géométries a permis de montrer que son écoulement était comparable à celui d'un liquide monophasique non newtonien du type Herschel-Bulkley présentant ainsi un seuil d'écoulement et un caractère rhéofluidifiant. Ces données seront à considérer pour la mise en œuvre du nettoyage de systèmes complexes.

## Perspectives

Dans une perspective d'implémentation à des échelles industrielles, nous évaluons maintenant la stabilité et l'efficacité nettoyante de ces mousses au travers d'équipements complexes. En parallèle, l'utilisation de surfactants / cosurfactants devrait permettre la structuration de mousses plus stables. Le rôle de ces mousses sur la physiologie bactérienne sera aussi étudié.

© Ming Yu

Exemple de morphologie obtenue pour une gouttelette séchée contenant entre 40 et 60 % de WPI dans le mélange.

# De la goutte au grain : une avancée majeure pour élucider les mécanismes de séchage des colloïdes laitiers



## En savoir plus

Yu M. *et al.*

Phase Diagram of Dairy Protein Mixes Obtained by Single Droplet Drying Experiments

Foods . 2022

<https://doi.org/10.3390/foods11040562>

## Partenariat

Ce travail s'inscrit dans le cadre du LIA Foodprint associant l'INRAE (STLO, UMET), l'Institut Agro Rennes-Angers et l'Université de Soochow (Chine).

## Contacts

Cécile Le Floch-Fouéré, Luca Lanotte et Romain Jeantet

UMR STLO

[cecile.lefloch@agrocampus-ouest.fr](mailto:cecile.lefloch@agrocampus-ouest.fr)

[luca.lanotte@inrae.fr](mailto:luca.lanotte@inrae.fr)

[romain.jeantet@agrocampus-ouest.fr](mailto:romain.jeantet@agrocampus-ouest.fr)



## Contexte

La complexité des formulations nutritionnelles et le contrôle relativement empirique du procédé de séchage induisent des problèmes à l'échelle industrielle, tant en matière de propriétés du produit (non-conformité par rapport aux propriétés attendues) que de performances du procédé. Afin de garantir les propriétés des formules infantiles, il est nécessaire de comprendre la transition de goutte à particule au cours du séchage. En effet, la chambre de séchage étant une « boîte noire », cela rend impossible l'observation en ligne de la formation des gouttelettes-particules. Il est donc nécessaire de croiser différents domaines de connaissances et de développer de nouveaux outils et méthodes analytiques pour mieux appréhender ces mécanismes.

## Résultats

L'étude de l'impact de la composition et de la concentration de la suspension sur la morphologie finale des gouttelettes a conduit à la construction d'un diagramme de morphologie capable de prédire la forme des particules laitières en fonction des caractéristiques de la dispersion initiale : concentration globale en protéines comprise entre 6 et 14 g.L<sup>-1</sup> ; rapport entre protéines de lactosérum (WPI) / micelles de caséine (NPC) compris entre 0 et 100 %. Ce diagramme permet d'identifier quatre types de morphologies spécifiques :

- particules obtenues de dispersion majoritaire en NPC qui présentent, quelle que soit la concentration totale, une surface ridée typique avec formation de vacuoles et sans délaminage aux bords ;
- particules issues de dispersion contenant entre 40 et 60 % de WPI et qui présentent, lorsque la concentration globale est inférieure à 9 g.L<sup>-1</sup>, une forme hybride (sphérique avec déformations) incluant une vacuole interne et un délaminage important ;
- particules issues de dispersion contenant plus de 40 % de WPI et qui présentent, lorsque la concentration globale est supérieure à 9 g.L<sup>-1</sup>, une interface lisse avec formation de vacuoles et délaminage aux bords ;
- particules issues de dispersions majoritaires en WPI, qui présentent, lorsque la concentration est inférieure à 9 g.L<sup>-1</sup>, une surface lisse typique des échantillons riches en WPI, mais avec un délaminage important et sans formation de vacuole.

## Perspectives

Loin de fournir une image globale et définitive de la physique du séchage dans les mélanges de protéines laitières, nos résultats représentent une étape préliminaire innovante vers l'objectif souhaité de contrôler et d'ajuster les propriétés fonctionnelles des formules infantiles à l'aide d'une méthode simple, rapide et peu coûteuse.



© Maheshchandra Patil - Surconcentration-granulation de perméat de lactosérum à l'échelle du laboratoire: concentré visqueux, surconcentré hautement cohésif et granules

## Séchage innovant de co-produits laitiers : vers une technologie moins énergivore



### En savoir plus

Patil M. H. *et al.*

Characterization of the superconcentration and granulation steps of a disruptive spray-drying free process for the manufacture of dairy powders

Journal of Food Engineering . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110865>

### Contacts

Cécile Le Floch-Fouéré, Gaëlle Tanguy et Romain Jeantet

UMR STLO

[cecile.lefloch@agrocampus-ouest.fr](mailto:cecile.lefloch@agrocampus-ouest.fr)

[gaelle.tanguy@inrae.fr](mailto:gaelle.tanguy@inrae.fr)

[romain.jeantet@agrocampus-ouest.fr](mailto:romain.jeantet@agrocampus-ouest.fr)



### Contexte

Dans le contexte actuel dominé par les préoccupations liées au changement climatique, la réduction de la consommation d'énergie lors du séchage est une priorité pour les industries qui cherchent à minimiser leur empreinte environnementale tout en maîtrisant leurs coûts. Un procédé de surconcentration-granulation a été développé (Poudre Sans Tour (PST), EP 3174402, 2016). Il comprend deux étapes : la surconcentration d'un produit préconcentré sous fort cisaillement pour maintenir celui-ci à l'état fluide et la granulation du surconcentré en particules discrètes à l'aide d'une poudre. Les premiers résultats ont démontré que ce procédé offrait une alternative au séchage par pulvérisation pour la production de poudres laitières aux propriétés fonctionnelles améliorées ou comparables, tout en réalisant des avancées significatives d'un point de vue environnemental et économique (consommation d'énergie et d'eau). L'objectif de ces travaux est de caractériser l'évolution des propriétés physiques de différents produits laitiers au cours de la surconcentration et leur comportement lors de la granulation afin de déterminer les paramètres critiques du procédé.

### Résultats

Ce travail a montré que la limite de la surconcentration est atteinte dès lors que le surconcentré présente un état peu fluide et hautement cohésif.

Par ailleurs, l'extrait sec marquant le début de la phase cohésive dépend de la composition des produits. Il ressort de cette étude que la forte cohésivité des surconcentrés, corrélée à leur teneur en protéines, impacte négativement le procédé de surconcentration-granulation. À l'inverse, la conduite de l'étape de granulation est améliorée avec des poudres protéiques. De plus, le dispositif développé à l'échelle du laboratoire est applicable à n'importe quel produit laitier ou alimentaire pour évaluer sa compatibilité avec l'approche de surconcentration-granulation, tout en permettant d'estimer les paramètres critiques et le potentiel d'économies d'énergie du procédé à l'échelle pilote. Enfin, la caractérisation de la technologie de déshydratation basée sur la surconcentration-granulation a abouti à une solution technique prometteuse pour formuler des produits laitiers complexes (eg, formules infantiles) en modulant la composition de la poudre utilisée lors de l'étape de granulation.

### Perspectives

Cette méthode de séchage innovant permet d'élargir la portée du procédé au-delà du traitement de fluides à teneur en lactose élevée et à valeur économique relativement faible pour englober des applications potentielles dans la production de produits à forte valeur ajoutée. Les travaux futurs se concentreront sur la validation des résultats à l'échelle pilote et industrielle pour une gamme de compositions laitières.



© Barbara Gouble  
Stockage de scaroles  
à différentes  
températures avant  
transformation en  
sachet 4ème gamme  
(projet OPTICOLD)



## Réduire la consommation énergétique du stockage de la matière première sans impacter la qualité des salades en sachet



### En savoir plus

Gouble B. *et al.*

Impact of storage time and temperature of salad heads on the quality of fresh-cut *Cichorium endivia*

Postharvest Biology and Technology .  
2022

<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.112050>

### Partenariat

- Collaboration de trois unités INRAE TRANSFORM (SQPOV - OPAALE - FRISE)

- Aériat

Dans le cadre du projet ANR OPTICOLD (ANR-15-CE21-0011)

### Contacts

Barbara Gouble, Maja Musse et Steven Duret

UMR SQPOV, UR OPAALE et UR FRISE

[barbara.gouble@inrae.fr](mailto:barbara.gouble@inrae.fr)

[maja.musse@inrae.fr](mailto:maja.musse@inrae.fr)

[steven.duret@inrae.fr](mailto:steven.duret@inrae.fr)



### Contexte

Le marché des fruits et légumes frais prêts à l'emploi (4ème gamme) représente 2,4 % du volume (8 % en valeur) des achats français de fruits et légumes mais cette transformation a un coût énergétique et de consommation d'eau important. Afin d'améliorer la durabilité de la chaîne du froid, le travail réalisé dans le projet OPTICOLD a été de cibler les points critiques dans l'usine de transformation susceptibles d'être modifiés sans impacter la sécurité microbiologique et la qualité finale de ces produits vivants découpés ayant une forte activité physiologique. Si les dernières étapes de la chaîne de production (à partir de la mise en sachet) et la commercialisation suivent une réglementation très stricte, avec une chaîne du froid impérativement à 4 °C, seules des recommandations existent pour les étapes amont (stockage et découpe des matières premières). Moduler les conditions de stockage des salades entières apparaît comme une piste d'économie d'énergie pour les industriels du secteur.

### Résultats

Sur la base de relevés de températures *in situ*, l'impact du couple durée/température de stockage des salades entières a été étudié sur la qualité des feuilles en sachet. De nombreux critères ont été analysés sur différentes scaroles : qualité visuelle globale, rosissement des sections,

atmosphère gazeuse des sachets résultant de la respiration des feuilles, flore d'altération, texture, état et transfert d'eau au niveau cellulaire (par relaxométrie RMN). Une augmentation de 3 °C de la température de stockage des salades (7 °C au lieu de 4 °C pendant 5 jours) n'a montré aucune différence significative pour tous les critères et très peu d'effet comparé aux salades transformées dès la récolte. Un stockage de plus longue durée (9 et 12 jours) et/ou à plus haute température (10 ou 12 °C) impacte plus fortement et rapidement l'ensemble des critères de qualité, à l'exception des flores d'altération. Le lavage à la suite du parage suffit au maintien d'une valeur acceptable de flore totale. Si les mesures de cisaillement ou rupture et d'état de l'eau des feuilles ont mis en évidence des phénomènes irréversibles de répartition d'eau dans les tissus foliaires, l'aspect global et le décompte des sections roses sont apparues comme les critères les plus discriminants.

### Perspectives

Ces résultats permettent d'envisager la modification de certaines pratiques dans les usines pour réduire les consommations énergétiques sans altération de qualité, en se basant sur le modèle d'aide à la décision développé dans OPTICOLD.



©Fatima Benmesbah - Le réacteur et son environnement

# Intérêt des milieux poreux pour stocker du froid avec des hydrates de gaz



## En savoir plus

Benmesbah F. D. *et al.*

Calorimetric study of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) hydrate formation and dissociation processes in porous media

Chemical Engineering Science . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.118108>

## Partenariat

- IFREMER
- Thèse en partenariat ; LFCR - IPRA, UMR5150 (Univ. Pau), comité scientifique de thèse

## Contacts

Pascal Clain, Anthony Delahaye et Laurence Fournaison

### UR FRISE

[pascal.clain@inrae.fr](mailto:pascal.clain@inrae.fr)

[anthony.delahaye@inrae.fr](mailto:anthony.delahaye@inrae.fr)

[laurence.fournaison@inrae.fr](mailto:laurence.fournaison@inrae.fr)



## Contexte

Dans un cadre de réchauffement climatique, les besoins en froid ne cessent de croître. Le développement des énergies renouvelables nécessite des moyens de stockage efficaces. Le stockage de froid est une solution pertinente qui permet, par ailleurs, d'augmenter l'efficacité énergétique d'une installation frigorifique. Les hydrates de gaz, qui sont des structures cristallines d'eau piégeant un gaz, sont des matériaux à changement de phase présentant des densités énergétiques élevées avec des températures de formation bien adaptées au stockage de froid. La formation des hydrates est favorisée par une surface d'échange la plus élevée possible entre le gaz et l'eau. Ainsi, un milieu poreux peut être un moyen favorable pour augmenter la quantité d'hydrates formés et donc la quantité d'énergie stockée. Néanmoins, il est nécessaire de vérifier que les conditions thermodynamiques et les cinétiques de formation et de dissociation ne soient pas pénalisantes pour le procédé de stockage. Ces conditions ont été investiguées pour différentes caractéristiques du milieu poreux.

## Résultats

L'étude de la cinétique de formation et de dissociation d'hydrates de gaz en milieu poreux et la caractérisation de la quantité

d'hydrates formés a été réalisée à l'aide d'une analyse thermique différentielle. Cette méthode calorimétrique (complémentaire des approches par bilans massiques) permet de suivre en temps réel la formation des hydrates, leurs conditions thermodynamiques de formation (pression et température) et ensuite de quantifier la masse d'hydrates formés dans le milieu poreux. Les temps d'induction (avant nucléation), la capacité de stockage et l'équilibre thermodynamique de stockage ont été étudiés en fonction de plusieurs paramètres, tels que la saturation en eau du milieu, de la taille des particules et de la morphologie du milieu poreux. Les résultats ne montrent pas de corrélation statistiquement significative entre ces facteurs et le temps d'induction. Mais ils ont mis en évidence que les milieux avec de petits pores et une double porosité permettraient d'augmenter la quantité d'hydrates formés.

## Perspectives

Ces résultats montrent l'intérêt des milieux poreux pour stocker l'énergie par hydrates de gaz. Une étude statistique des résultats et une modélisation des phénomènes couplés massiques et thermiques permettra de prédire les conditions opératoires idéales pour former des quantités d'hydrates les plus élevées possibles dans des conditions thermodynamiques favorables.

## Partie 3

# Améliorer l'acceptabilité de nouveaux aliments et diminuer les risques alimentaires



La tendance actuelle pour augmenter la durabilité des aliments est de substituer les protéines végétales aux protéines animales. Mieux connaître la préparation et la digestion de nouveaux aliments, les exemples présentés ici sont nombreux. L'allergénicité d'une protéine de blé et un moyen de prévenir une allergie alimentaire chez la descendance sont également abordés.

Il est également nécessaire d'améliorer l'acceptabilité de ces nouveaux aliments par le consommateur, et plus généralement de comprendre l'appréciation des aliments par l'étude du microbiote oral ou du rôle de la muqueuse orale, voire des mécanismes cérébraux de perception.

Préserver la sécurité sanitaire des aliments reste une priorité. Elle est ici déclinée sur les aliments infantiles, le saucisson, les thés, la viande.

## Focus sur la digestion des oméga 6 et 3 des végétaux



### En savoir plus

Kergomard J. *et al.*

Modulation of gastric lipase adsorption onto mixed galactolipid-phospholipid films by addition of phytosterols

Colloids and Surfaces B: Biointerfaces . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112933>

### Partenariat

- Frédéric Carrière, Enzymology of Supramolecular Systems at the Bioenergetics and Protein Engineering laboratory (CNRS, Aix Marseille University), Marseille
- Jacques Fattaccioli, Institut Pierre Gilles De Gennes (IPGG / ENS / Sorbonne Université / CNRS), Paris

### Contacts

Claire Bourlieu-Lacanal et Véronique Vié

UMR IATE

[claire.bourlieu-lacanal@inrae.fr](mailto:claire.bourlieu-lacanal@inrae.fr)

[veronique.vie@univ-rennes.fr](mailto:veronique.vie@univ-rennes.fr)



### Contexte

Les organismes de santé recommandent aujourd'hui de diversifier notre prise alimentaire et d'augmenter nos apports en acides gras polyinsaturés (AGPI) pour lutter contre l'augmentation des maladies chroniques. De nombreuses sources végétales (graines de lin, colza, noix... mais aussi les végétaux verts) contiennent ces précieux acides gras (en particulier ceux de la série oméga 3) sous différentes formes moléculaires intéressantes pour la nutrition humaine et souvent associées à des composés antioxydants. Afin d'exploiter de façon optimale ces sources végétales riches en oméga 3, il est nécessaire de comprendre leur devenir dans le tractus gastro-intestinal humain. En utilisant deux substrats modèles (la noix et la microalgue chlorelle), nous avons étudié les assemblages lipidiques, leurs interactions avec les enzymes digestives (gastrique et intestinale), et leurs mécanismes d'hydrolyse par ces enzymes, de l'échelle nanoscopique à l'échelle microscopique. Ce travail est pionnier dans le domaine de la digestion humaine des lipides issus du végétal, car il utilise des modèles membranaires composés de mélanges complexes de galactolipides et de phospholipides.

### Résultats

Les résultats apportent une compréhension approfondie des mécanismes d'interactions entre les enzymes digestives et les assemblages membranaires végétaux. Globalement, les assemblages lipidiques végétaux sont riches en certains lipides

polaires (des lipides glycosylés ou galactolipides), qui concentrent des quantités importantes d'acides gras polyinsaturés oméga 3, et présentent des propriétés émulsifiantes et antioxydantes naturelles. Ce travail a permis de rendre compte de l'impact des spécificités physico-chimiques de ces assemblages membranaires naturels sur l'activité des lipases (gastrique, phospholipase A2, lipase pancréatique apparentée de type 2). Nous avons ainsi démontré que la lipase gastrique s'adsorbe sur ces assemblages en réduisant la tension membranaire, en jouant le rôle d'agent de sacrifice et en favorisant l'insertion d'autres lipases. La forte activité enzymatique de la lipase pancréatique apparentée de type 2, sur les galactolipides, mais aussi sur les phospholipides, a été caractérisée sur ces systèmes complexes issus du végétal.

### Perspectives

Ces travaux contribueront à l'amélioration des formulations végétales afin de vectoriser des oméga 3 en veillant à leur bonne bioaccessibilité, et rééquilibrer ainsi les régimes alimentaires humains et animaux. Cette étude se poursuit par la mise en place d'une étude préclinique (portée par CarMeN - INSERM U1060/ INRAE U1397/ Université Lyon1) qui vise à déterminer l'impact de la structure moléculaire des lipides végétaux sur la vectorisation des oméga 3 (forme galactolipides versus contrôle classique sous forme non polaire triacylglycérols), et les effets cardiométaboliques protecteurs subséquents.

# Stratégie de reformulation pour des produits plus sains et appréciés par les enfants



## En savoir plus

Liechti C. *et al.*

"How to Select a Representative Product Set From Market Inventory?" A Multicriteria Approach as a Base for Future Reformulation of Cookies

Frontiers in Nutrition . 2022

<https://doi.org/10.3389/fnut.2021.749596>

## Valorisation

Ce travail a fait l'objet de la thèse de Carole Liechti soutenue en juin 2022.

## Contacts

Anne Saint-Eve et Véronique Bosc

UMR SAYFOOD

[anne.saint-eve@agroparistech.fr](mailto:anne.saint-eve@agroparistech.fr)

[veronique.bosc@agroparistech.fr](mailto:veronique.bosc@agroparistech.fr)



## Contexte

En Europe, l'épidémie d'obésité infantile est en constante progression. Le projet H2020-STOP a pour objectif d'inverser cette vague d'obésité en étudiant différentes approches de prévention et de traitement pour définir des politiques nutritionnelles adaptées. Un des leviers possibles est la reformulation des aliments afin de proposer une approche multicritères pour développer des produits plus sains pour les enfants, tout en maintenant ou optimisant leur appréciation.

## Résultats

La première étape de ce travail a porté sur l'étude de la diversité des recettes des biscuits du marché français, en tenant compte de leur composition, des caractéristiques nutritionnelles, de la teneur en eau et de paramètres sensoriels. Des analyses sensorielles, physicochimiques et leur appréciation par des enfants (n=151, âgés de 7 à 12 ans) ont été évaluées sur un sous-ensemble réduit de produits afin d'identifier les principales opportunités de reformulation.

Dans un deuxième temps, une stratégie de formulation des cookies, impliquant les perceptions et les propriétés de texture a été proposée, par la mise en œuvre d'un plan de mélange comprenant quatre ingrédients clé (sucre, matière grasse, chocolat, son d'avoine), et un facteur de procédé

(paramètres de cuisson). Trente biscuits ont ainsi été développés et caractérisés sur de multiples critères, dont l'indice glycémique *in vitro* ou l'évolution de la texture des produits et du bol alimentaire (temps en bouche avant déglutition). De plus, la perception, la satiété et les préférences des enfants (n=80, âgés de 10 à 12 ans) ont été évaluées pour quatre de ces biscuits reformulés. Ce travail a conduit à la modélisation sensorielle et à l'optimisation des recettes, pour créer des recettes plus saines ayant un impact positif sur l'appréciation et la santé.

Cette approche a ainsi conduit à proposer une amélioration de la composition nutritionnelle des cookies, sans ajouter d'additif, avec une amélioration de l'indice glycémique calculé. Le maintien d'un niveau élevé d'appréciation par les enfants a été confirmé.

## Perspectives

Cette approche multicritères de reformulation des aliments est ainsi un outil prometteur pour améliorer l'offre alimentaire de produits largement consommés par les enfants. L'impact de ces nouvelles formulations, présentant des textures variées est envisagée sur le comportement des enfants (rassasiement et satiété), ainsi que sur la digestion (indice glycémique *in vivo*).



# Une imprimante 3D pour concevoir des aliments fonctionnels à base de protéines carnées



## En savoir plus

Portanguen S. *et al.*

Development of a 3D printer for the manufacture of functional food protein gels

Foods . 2022

<https://doi.org/10.3390/foods11030458>

## Valorisation

Déclaration d'Invention et de Résultats Valorisables DI-RV-21-0012 (2021): Adaptation et optimisation d'une imprimante 3D FDM (Fused Deposition Modeling) pour la conception d'aliments fonctionnels de type produits carnés. Inventeurs : Tournayre, P., Gibert, P., Portanguen, S., Mirade, P.S

## Contact

Stéphane Portanguen

UR QuaPA

[stephane.portanguen@inrae.fr](mailto:stephane.portanguen@inrae.fr)



## Contexte

Une part importante de la population mondiale a des difficultés à mastiquer ou déglutir (population vieillissante, en situation de déficit masticatoire en lien avec une pathologie...). Il est donc pertinent de pouvoir leur fournir des aliments texturés et de composition nutritionnelle adaptée. La viande est un aliment riche en protéines mais difficile à mastiquer. Des aliments alternatifs riches en protéines sont actuellement commercialisés, mais sont peu appétents et leur texture ne permet pas de maintenir efficacement le processus physiologique de mastication qui a alors tendance à continuer à se dégrader. Le recours à une texturation par des additifs est alors souvent envisagé. Grâce à l'impression 3D alimentaire, du fait de la maîtrise de son procédé, il est possible de concevoir des aliments texturés et sains, adaptés à des populations ciblées.

## Résultats

Un prototype d'imprimante alimentaire 3D a été développé sur la base d'une imprimante du commerce. Il permet d'associer une extrusion à chaud, assurée par un doseur volumétrique de précision et un dépôt sur une surface froide (régulation par un module à effet Peltier). Ce dispositif inédit, permet de contrôler la forme interne et externe de l'aliment et ainsi éviter l'utilisation d'additifs texturants pour l'impression de gels protéiques. Le contrôle de la géométrie, notamment, en termes de dimensions et de texture

(fermeté), est assuré pour des structures complexes, composées de plusieurs ingrédients, ce qui permet désormais d'envisager la conception d'aliments fonctionnels, non seulement à base de gels protéiques, mais aussi intégrant des protéines musculaires associées à des ingrédients multi-sourcés. Les couches déposées sont de 200 µm d'épaisseur pour un débit réglable entre 0,001 et 0,610 mL.min<sup>-1</sup>, sans influence de la température d'extrusion jusqu'à 60 °C et, une vitesse de déplacement comprise entre 2 et 20 mm.s<sup>-1</sup>. Afin d'assurer la qualité des impressions 3D alimentaires, différents éléments ont été conçus en parallèle : un système de purge automatique par barrière optique permet d'éliminer d'éventuelles bulles d'air, garantissant ainsi un débit régulier lors de la phase d'extrusion à l'aide de buses en acier inoxydable 316L de 0,69 mm de diamètre, fabriquées au laboratoire par impression 3D métal.

## Perspectives

L'objectif de ces travaux est de concevoir un dispositif capable d'imprimer, en 3D, un ensemble d'aliments avec des gammes de texture différentes afin de répondre aux besoins de populations ciblées. Le couplage du procédé d'impression 3D avec un système de cuisson intégré permettra de proposer des aliments fonctionnels (riches en protéines multisourcées issues de coproduits), prêts à être consommés et, dont la mastication et la déglutition seront facilitées pour des personnes souffrant de déficiences masticatoires.

# Les tensioactifs modulent la lipolyse des acides gras des émulsions sans altérer leur bioaccessibilité



## En savoir plus

Pizones Ruiz-Henestrosa V. M. *et al.*  
Emulsifiers modulate the extent of gastric lipolysis during the dynamic *in vitro* digestion of submicron chia oil/water emulsions with limited impact on the final extent of intestinal lipolysis  
Food Hydrocolloids . 2022  
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107336>

## Partenariat

- ITAPROQ - Departamento de Industrias, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Universitaria (1428), Buenos Aires, Argentina CONICET, Argentina
- Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, Universidad de Sevilla (41011), Sevilla, Spain (affiliation actuelle du premier auteur Víctor M. Pizones Ruiz-Henestrosa)

## Contact

Anne Meynier  
UR BIA  
[anne.meynier@inrae.fr](mailto:anne.meynier@inrae.fr)



## Contexte

Les apports en acides gras oméga 3 sont globalement insuffisants pour la population française, comme européenne. Il est donc important de diversifier les offres de produits alimentaires riches en ces nutriments, notamment pour les personnes ne consommant pas de poissons ou d'autres sources animales comme la viande de volaille ou les œufs. Augmenter la prise alimentaire des oméga 3 nécessite (i) de diversifier l'offre des produits pour satisfaire le plus grand nombre de consommateurs, (ii) de s'assurer de la stabilité physique et chimique des structures élaborées et finalement (iii) de s'assurer que les oméga 3 sont efficacement libérés, sans oxydation, lors de la digestion pour être absorbés et métabolisés et ainsi exercer leurs effets bénéfiques pour la santé.

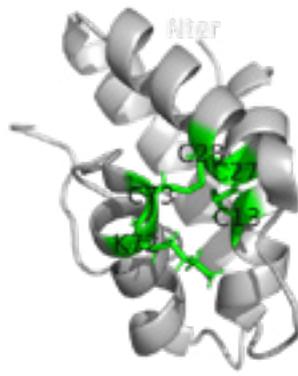
## Résultats

Le choix de l'émulsifiant (protéine vs tensioactifs) stabilisant l'émulsion d'huile de chia impacte les cinétiques de lipolyse gastrique dont le niveau varie de 30 % dans le cas de la  $\beta$ -lactoglobuline à 2 % dans le cas du Tween 80. Le taux de lipolyse gastrique des émulsions stabilisées par un phospholipide atteint 20 %. Par contre, dans les compartiments duodéal et intestin grêle distal, les différences de lipolyse s'estompent pour être non significatives en fin de digestion.

La bioaccessibilité des acides gras (fraction incorporée dans les micelles mixtes) et en particulier de l'acide alpha-linolénique est supérieure après digestion des émulsions stabilisées par la  $\beta$ -lactoglobuline (60 %), cette valeur est de 55 % dans le cas des émulsions stabilisées par le Tween 80 et 50 % pour les émulsions stabilisées par le phospholipide. L'originalité de ce travail réside dans la prise en compte de la dynamique de la digestion et notamment par les variations de pH au cours de la phase gastrique impactant potentiellement la stabilité des émulsions. Les vidanges entre les différents compartiments du digesteur ont également été prises en compte.

## Perspectives

L'augmentation des apports en acides gras polyinsaturés des aliments doit passer par (i) une diversification des sources potentielles d'acides gras oméga 3, (ii) une meilleure compréhension de la stabilité vis-à-vis de l'oxydation de ces entités lors de la transformation des matières premières et/ou de la fabrication des aliments et de leur conservation, (iii) une stabilité oxydative au cours de la digestion alliée à une bioaccessibilité satisfaisante (>50%).



© BIA-IATE - Les acides aminés et éléments structuraux déterminants pour l'interaction allergène (LTP1) de blé / anticorps de patients allergiques sont regroupés dans la structure 3D de la protéine.

# Mise en lumière d'éléments structuraux majeurs pour l'allergénicité d'une protéine de blé



## En savoir plus

Mameri H. *et al.*

Critical structural elements for the antigenicity of wheat allergen LTP1 (Tri a 14) revealed by site-directed mutagenesis

Scientific Reports . 2022

<https://doi.org/10.1038/s41598-022-15811-5>

## Partenariat

- INRAE UMR IJPB, Centre de Versailles
- INRAE plateforme BIBS (Infrastructure de recherche PROBE),



- Synchrotron SOLEIL
- Centres hospitaliers du Luxembourg et de Metz

## Contacts

Sandra Denery et Hamza Mameri

UR BIA et UMR IATE

[sandra.denery@inrae.fr](mailto:sandra.denery@inrae.fr)

[hamza.mameri@inrae.fr](mailto:hamza.mameri@inrae.fr)



## Contexte

La plupart des réactions allergiques mettent en jeu des interactions entre des anticorps IgE et des allergènes protéiques. La localisation de ces zones d'interactions appelées « épitopes » permet de connaître les ressemblances entre des allergènes de pollens et d'aliments et le risque de réactions croisées chez un patient.

Les protéines de transfert de lipides (LTP) sont des allergènes de pollens, de fruits, de céréales... pouvant entraîner des allergies à de multiples plantes et aliments.

Nous avons caractérisé des épitopes de la LTP1 de blé par une combinaison d'approches d'immunochimie, de biologie moléculaire (mutagenèse dirigée) et de biologie structurale (dichroïsme circulaire utilisant le rayonnement synchrotron et modélisation moléculaire) pour évaluer l'importance d'éléments de structure sur l'interaction LTP1 / IgE.

## Résultats

Nous avons montré que quatre des huit acides aminés (a.a.) qui rapprochent différentes parties de la chaîne protéique ont un rôle primordial dans la conservation de l'interaction LTP1 / anticorps IgE et dans son activité biologique dans un modèle cellulaire mimant le déclenchement des

symptômes. D'eux d'entre eux jouent un rôle capital sur le maintien de la structure globale de la LTP1 de blé.

Nous avons identifié un a.a. chargé clé parmi des résidus très conservés. Le remplacement de cet a.a. par un autre non chargé réduit très fortement l'interaction IgE / LTP1. Cette mutation modifie localement la structure de la protéine.

Ces cinq a.a. sont regroupés dans la structure 3D de la protéine. Ils sont également indispensables à la liaison de la LTP1 de blé à d'autres types d'anticorps (produits chez la souris), ce qui indique leur rôle essentiel dans l'interaction de cette protéine avec le système immunitaire de façon générale.

## Perspectives

Les connaissances sont encore incomplètes pour comprendre pourquoi certaines protéines ont un fort potentiel allergène. Nos résultats sur la LTP1 de blé ont établi l'importance de certains éléments de structure par rapport à d'autres ; ils pourraient s'avérer génériques à plusieurs membres de cette famille d'allergènes végétaux. Ces données ouvrent des perspectives pour améliorer le diagnostic des réactions croisées et pour envisager des stratégies de traitement.

# Prévenir la survenue d'une allergie alimentaire chez la descendance



## En savoir plus

Selle A., Brosseau C. *et al.*

Prebiotic Supplementation During Gestation Induces a Tolerogenic Environment and a Protective Microbiota in Offspring Mitigating Food Allergy

Frontiers in Immunology . 2022

<https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.745535>

## Partenariat

**Industriel** : Fournisseurs de prébiotiques

- GOS : FrieslandCampina, Wageningen, Pays Bas (Delsing D.)
- Inuline : Beneo GmbH, Obrigheim Allemagne (Theis S.)

**Académique** :

- Analyse du microbiote : UMR INRAE MICALIS, AlimH et MICA (Langella P., Cherbuy C., Jouy-en-Josas)

**Analyse statistique** :

- ONIRIS et INRAE USC StatSC (unité sous contrat INRAE, Cariou V., Qannari E.M.)

## Contact

Marie Bodinier

UR BIA

[marie.bodinier@inrae.fr](mailto:marie.bodinier@inrae.fr)



## Contexte

Les allergies alimentaires (AA) touchent 6 % des enfants de moins de 5 ans en Europe et causent des symptômes variés, parfois mortels. Elles sont liées au dysfonctionnement du système immunitaire et du microbiote. Or ces systèmes se mettent en place au cours des 1000 premiers jours de vie (de la conception aux deux ans de vie) et sont modulés par l'alimentation de la mère et du nourrisson le rendant ainsi susceptible ou non à développer des maladies comme les allergies (DoHAD). A ce jour, il n'existe pas de stratégie préventive efficace contre les allergies, mais les prébiotiques semblent être des candidats pertinents dans le contexte des AA par leur capacité à augmenter les bactéries bénéfiques pour la santé et induire un environnement tolérrogène protecteur. Nous avons évalué l'effet préventif d'une supplémentation en GOS/inuline pendant la gestation sur la survenue d'une AA chez la descendance *via* un modèle murin.

## Résultats

La supplémentation en GOS/inuline pendant la gestation a modifié la composition et la fonction du microbiote fécal des mères et a induit une signature microbienne spécifique chez la descendance. Elle a aussi conduit chez la descendance à l'induction de biomarqueurs immuns tolérrogènes protecteurs des allergies.

Nous avons montré auparavant que cette empreinte tolérrogène était présente *in utero*. Ainsi, ces nouvelles données montrent que l'empreinte immunitaire acquise *in utero* suite à la consommation maternelle de prébiotiques perdure dans le temps. Cet environnement tolérrogène permet de réduire le développement de l'AA chez la progéniture *via* une diminution significative des symptômes et des biomarqueurs allergiques ainsi qu'une augmentation des facteurs tolérrogènes. Ainsi, nos résultats montrent, pour la première fois, que la supplémentation en prébiotiques pendant la grossesse est une stratégie efficace pour réduire l'AA chez la descendance.

## Perspectives

Nous étudions actuellement les effets d'une telle stratégie chez l'homme dans l'essai clinique PREGALL qui vise à supplémenter en prébiotiques GOS/inuline des femmes allergiques pendant leur grossesse pour prévenir de l'allergie chez leur enfant futur. Dans cet essai des échantillons biologiques sont récoltés pour caractériser les mécanismes immuns et microbiens au sein du projet ANR CIMMAP. Ces résultats permettront de mettre en place des recommandations nutritionnelles pour les femmes enceintes à risque d'avoir un enfant allergique.



© ADIV, Laurent Picgirard

# La réduction des nitrites et nitrates dans le saucisson: quelles implications sanitaires ?



## En savoir plus

Keuleyan E. *et al.*

*In vitro* digestion of nitrite and nitrate preserved fermented sausages – New understandings of nitroso-compounds' chemical reactivity in the digestive tract

Food Chemistry . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100474>

- Anses. 2022. Évaluation des risques liés à la consommation de nitrates et nitrites. Rapport d'expertise collective Juillet 2022

AVIS révisé et RAPPORT de l'Anses relatif aux risques associés à la consommation de nitrites et de nitrates | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

- Projet collaboratif ADDUITS : Un programme de recherche pour une innovation adaptée aux nouvelles demandes sociétales, dans le respect des traditions et de l'excellence des produits charcutiers <https://adduits.ifip.asso.fr/>

## Contact

Véronique Santé-Lhoutellier

UR QuaPA

[veronique.sante-lhoutellier@inrae.fr](mailto:veronique.sante-lhoutellier@inrae.fr)



## Contexte

En 2018, le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC/IARC), et l'agence de recherche sur le cancer de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), classait la consommation de viande transformée comme "cancérogène pour l'homme" en particulier pour la carcinogenèse colorectale (CCR). Certains composés N-nitrosés issus des additifs nitrés utilisés dans la viande transformée sont associés à ces propriétés cancérogènes. L'expertise relative aux risques associés à la consommation de nitrites et de nitrates de l'ANSES et leurs conclusions récentes a conduit toutes les parties prenantes (pouvoir public, chercheurs et industriels) au développement d'une stratégie d'abaissement des nitrites. Nos travaux sur l'impact de la réduction des apports de nitrites et nitrates dans le saucisson sec s'inscrivent dans cette ligne.

## Résultats

Il s'agit d'élucider la réactivité chimique du nitrite et du nitrate pendant la digestion *in vitro* de saucisson sec de formulation réduite (NaNO<sub>2</sub> / NaNO<sub>3</sub>, en ppm : 0/0 ; 80/80 ; 120/120 ; 0/200), en quantifiant les composés N-nitrosés et le niveau d'oxydation dans le produit et au cours de sa digestion. L'oxydation des lipides (TBARS) au cours de la digestion permet de distinguer les différentes formulations de saucissons secs en fonction de leur teneur en nitrites/nitrates. En l'absence de nitrite et de

nitrate, une quantité significativement plus importante de TBARS a été mesurée à la fois à la fin de la digestion gastrique et à la fin de la phase intestinale, par rapport aux trois autres formules. Ce résultat s'explique par la capacité de l'oxyde nitrique à se lier aux radicaux lipoperoxydes, pour former des composés nitrosolipoperoxydes stables dans l'environnement physico-chimique digestif. Aucun nitrite résiduel n'est détecté en l'absence de l'additif dans la formulation du produit et ce taux est proportionnel aux concentrations croissantes apportées dans l'aliment. Concernant les nitrates résiduels, une quantité basale est retrouvée même en l'absence d'additifs en raison de la composition intrinsèque de la viande. Les quantités résiduelles de nitrite et nitrate augmentent avec les quantités introduites. Lors de la digestion, les quantités de nitrosamines ont augmenté pour toutes les formulations, soulignant une synthèse endogène d'environ 25 % de nitrosamines non volatiles pendant la digestion.

## Perspectives

Nos travaux démontrent qu'une réduction à 80/80 ppm de nitrite/nitrate est suffisante pour protéger contre l'oxydation lipidique dans le tube digestif. Cependant, pour répondre à la proposition de loi visant la suppression des additifs nitrés, une formulation avec des antioxydants naturels devra être envisagée.



© QUAPA - Consortium SAFFI à l'occasion de la deuxième réunion annuelle du projet SAFFI (26, 27 et 28 Septembre 2022 à Clermont-Ferrand)

## Des stratégies pour renforcer la sécurité sanitaire des aliments infantiles – le projet H2020 SAFFI



### En savoir plus

Engel E. *et al.*

Safe food for infants: An EU-China project to enhance the control of safety risks raised by microbial and chemical hazards all along the infant food chains

Global Pediatrics . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.gpeds.2022.100009>

### Contact

Erwan Engel

UR QuaPA

[erwan.engel@inrae.fr](mailto:erwan.engel@inrae.fr)



### Contexte

Le projet sino-européen SAFFI (<https://www.saffi.eu/>) est un projet de recherche et d'innovation coordonné par l'unité QuaPA. Ce projet implique huit partenaires académiques, cinq industriels de l'alimentation infantile, deux agences sanitaires, une association internationale de pédiatres, trois PME technologiques et INRAE transfert. Sept pays européens et deux provinces chinoises sont impliqués. La stratégie globale du projet pour renforcer et/ou améliorer la qualité sanitaire des produits infantiles et trois des leviers développés tout particulièrement par INRAE sont détaillés ci-après.

### Résultats

Un premier levier exploré dans SAFFI consiste à proposer une meilleure maîtrise des dangers chimiques et microbiologiques en mettant en œuvre des procédés de transformation "doux" qui sont réputés bénéfiques d'un point de vue nutritionnel et sensoriel. La stratégie adoptée vise à évaluer par rapport aux traitements de préservation thermiques classiques, la qualité sanitaire des aliments infantiles obtenus par plusieurs traitements alternatifs utilisables sur les principaux produits infantiles (séchage par combustion pulsée, radiofréquences, hautes-pressions).

Le second levier propose des options innovantes couplant bioessais, chimie analytique et bioinformatique pour renforcer la surveillance chimique des aliments infantiles. Il s'agit de stratégie haut-débit à coût maîtrisé

(sample pooling, biosenseurs, marqueurs d'exposition) pour améliorer la surveillance des contaminants chimiques prioritaires. Ce travail introduit également des approches inspirées de l'écotoxicologie pour découvrir le large éventail des contaminants inattendus ou encore inconnus dans nos aliments.

Un troisième levier consiste à développer de nouvelles approches de microbiologie prédictive ne se limitant plus uniquement à caractériser la bactérie pathogène après l'avoir isolée de l'aliment. L'apport informatif complémentaire de méthodes multiomiques qui permettent de phénotyper l'environnement microbien que le pathogène va rencontrer dans l'aliment aux différentes étapes de son élaboration est présenté. Ces méthodes permettront d'identifier des éléments de cet environnement qui peuvent favoriser ou au contraire limiter le développement des pathogènes.

### Perspectives

Les solutions proposées devraient permettre 1/ d'améliorer la sécurité sanitaire de la plupart des filières alimentaires, 2/ de promouvoir l'innovation en alimentation infantile, sciences analytiques et sciences des données, 3/ d'améliorer la santé de l'homme en jouant sur son alimentation à un stade décisif de sa vie, les mille premiers jours, 4/ d'aider les autorités sanitaires et les régulateurs du marché à promouvoir la confiance des consommateurs, 5/ de fournir des outils à l'industrie pour améliorer la transparence.

## Quantification de haute précision et robuste des résidus de pesticides dans le thé



### En savoir plus

Ly T.K. *et al.*

Quantification of 397 pesticide residues in different types of commercial teas: Validation of high accuracy methods and quality assessment

Food Chemistry . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130986>

### Partenariat

- Mariage Frères, Paris
- Au Vietnam, avec de nombreux producteurs de thés, ainsi qu'avec la Faculty of Environmental and Food Engineering - Nguyen Tat Thanh University (NTTU) et CASE (Center of Analytical Services and Experimentation), Ho Chi Minh ville.

### Contacts

Philippe Behra, Tran-Thi Nhu-Trang  
et Ly Tuan Kiet

UMR LCA Ensiacet

[philippe.behra@toulouse-inp.fr](mailto:philippe.behra@toulouse-inp.fr) (LCA)

[tntrang@ntt.edu.vn](mailto:tntrang@ntt.edu.vn) (NTTU)

[kietlt@case.vn](mailto:kietlt@case.vn) (CASE)



### Contexte

En raison des pratiques agricoles de type monoculture, les pesticides dans la culture du thé, deuxième boisson la plus consommée au monde, sont très couramment utilisés. Comme le nombre de pesticides utilisés a fortement augmenté, de nombreux pays ont fixé des limites maximales de résidus (LMR) de pesticides dans les produits à base de thé pour protéger la santé des consommateurs. Dans l'Union européenne (UE), les LMR pour les pesticides dans le thé concernent plus de 480 composés et leurs métabolites. Le contrôle de ces résidus nécessite donc des analyses régulières des échantillons afin d'évaluer si ces limites sont bien respectées. Le développement de méthodes avec une haute sensibilité, fiabilité et robustesse pour analyser ces résidus de multi-pesticides dans le thé constitue donc un défi de taille, car le thé est un produit complexe possédant de nombreux composés organiques comme les polyphénols pouvant interférer avec les résultats d'analyse.

### Résultats

106 échantillons de thé ont été testés (blancs, verts, oolongs, pu'erh et noirs). 80 échantillons ont un taux de conformité pour les résidus de pesticides. Les 26 autres thés sont non conformes par rapport à la réglementation européenne en matière de LMR, avec 43 violations de résidus

de pesticides. Parmi ces 26 thés, aucun thé n'est classé comme "biologique". En proportion, les échantillons de thé oolong (100 %) possèdent le plus de pesticides détectés, suivis des thés verts, du thé noir, du thé blanc, mais aussi du thé pu'erh. Les pesticides les plus fréquemment détectés sont les néonicotinoïdes, les pyréthroïdes de synthèse et les fongicides triazolés. Dans cette étude, les échantillons de thés d'origine taïwanaise analysés sont les plus contaminés par les pesticides avec 83,3 %, suivis de la Chine (73,7 %), du Vietnam (64,7 %) et de l'Inde (55,0 %).

### Perspectives

Ces travaux montrent la nécessité de continuer à évaluer les résidus de pesticides dans les thés commerciaux vendus et produits en UE mais aussi dans les principaux pays producteurs, comme la Chine, Taïwan, l'Inde et le Vietnam.

Cela nécessite aussi de modifier, valider et appliquer ces nouvelles méthodes d'analyse au cas des liqueurs de thé (infusions), en fonction des différentes méthodes de préparation afin d'évaluer les risques liés à leur consommation.



©AdobeStock -  
Tsuboya

# Dégradation des résidus d'antibiotiques au cours de la cuisson de la viande



## En savoir plus

Planche C. *et al.*

Fate of Sulfonamides and Tetracyclines in Meat during Pan Cooking: Focus on the Thermodegradation of Sulfamethoxazole Molecules . 2022

<https://doi.org/10.3390/molecules27196233>

Travaux réalisés dans le cadre du projet ANR SOMEAT (ANR-12-ALID-004)

## Partenariat

- INRAE UMR Toxalim
- ANSES, Laboratoire de Fougères

## Contact

Christelle Planche

UR QuaPA

[christelle.planche@inrae.fr](mailto:christelle.planche@inrae.fr)



## Contexte

Les substances vétérinaires sont largement utilisées pour la prévention et le traitement des maladies chez les animaux d'élevage. Parmi ces substances, les sulfamides et les tétracyclines sont deux des familles d'antibiotiques les plus utilisées actuellement. Cependant, si les délais d'attente ou la posologie de ces médicaments ne sont pas respectés, des résidus de ces antibiotiques peuvent subsister dans les produits alimentaires d'origine animale et le risque qu'ils représentent pour la santé humaine ne peut être ignoré. Aujourd'hui, ce risque est le plus souvent évalué à partir de leurs niveaux de concentration dans les aliments crus alors que ces niveaux peuvent être affectés par le traitement thermique que l'aliment subit avant sa consommation. Cette étude visait donc à évaluer l'impact de la cuisson sur les sulfamides et tétracyclines susceptibles d'être retrouvés dans la viande.

## Résultats

Les résultats de cette étude ont permis de montrer que le devenir des antibiotiques au cours de la cuisson de la viande est très variable d'une molécule à l'autre, avec des pertes à la cuisson pouvant atteindre 45 % pour le sulfaméthoxazole. Une

approche preuve de concept basée sur l'utilisation du radiomarquage et un suivi au cours de la cuisson des résidus radioactifs a alors été réalisée sur cette substance. Cette approche a permis de démontrer que les pertes observées pouvaient être la conséquence d'une dégradation thermique des antibiotiques lors de la cuisson. Six composés de dégradation du sulfaméthoxazole ont ainsi pu être détectés dans la viande cuite et un schéma de dégradation thermique a pu être proposé.

## Perspectives

Cette étude souligne l'importance de prendre en compte l'étape de cuisson dans les procédures d'évaluation du risque chimique compte tenu de son impact sur le niveau de contaminants chimiques dans la viande et sur la formation de composés de dégradation potentiellement toxiques. Afin d'aller plus loin, il sera intéressant d'étendre cette recherche à d'autres contaminants chimiques alimentaires et d'entreprendre des études toxicologiques afin d'évaluer la toxicité potentielle des produits de dégradation néoformés au cours de la cuisson.



© AdobeStock - September

# Des marqueurs volatils hépatiques pour détecter des contaminations aux retardateurs de flamme bromés chez les volailles et les porcs



## En savoir plus

Ratel J. *et al.*

Identification by volatolomics of hydrocarbon, oxygenated, sulfur and aromatic markers of livestock exposure to  $\alpha$ -hexabromocyclododecane

Food Chemistry . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131504>

## Partenariat

Fait marquant réalisé dans le cadre du projet CASDAR n°7106, en collaboration avec:

- Les instituts techniques des filières avicole (ITAVI, Nouzilly) et porcine (IFIP, Toulouse),
- INRAE UMR BOA (Nouzilly),
- INRAE/Oniris UMR Laberca (Nantes)

## Contact

Jérémy Ratel

UR QuaPA

[jeremy.ratel@inrae.fr](mailto:jeremy.ratel@inrae.fr)



## Contexte

Les aliments d'origine animale, comme les œufs et la viande, peuvent accidentellement être contaminés par de très fortes concentrations d'hexabromocyclododecane (HBCDD), retardateur de flamme bromé (RFB) longtemps utilisé dans la fabrication des matériaux isolants. Le récent avis scientifique publié par l'EFSA (Autorité Européenne de Sécurité des Aliments) sur l'HBCDD présent dans les aliments souligne un potentiel problème de santé - en raison notamment de ses propriétés de perturbateur endocrinien - pour les nourrissons allaités qui consommeraient du lait maternel en grande quantité avec des niveaux élevés d'HBCDD. Les aliments d'origine animale constituent le principal vecteur d'exposition des adultes aux RFB. Aujourd'hui, les méthodes analytiques utilisées pour doser les différents isomères d'HBCDD dans les aliments sont coûteuses et lourdes à mettre en œuvre, notamment en raison de leur omniprésence dans l'environnement des laboratoires. Des approches « omiques » ont émergé pour pallier ces limites analytiques, en recherchant dans l'organisme des animaux d'élevage, des composés métaboliques marqueurs de la contamination chimique. Parmi ces approches, la volatolomique apparaît particulièrement prometteuse. L'enjeu du travail était de confirmer l'intérêt du volatolome de l'organe de détoxification des animaux, le foie, pour révéler une contamination à l'HBCDD, en s'intéressant à l' $\alpha$ -HBCDD - qui est l'isomère prédominant

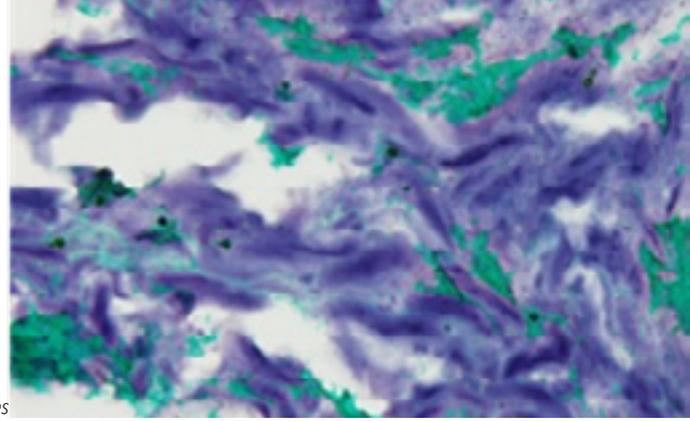
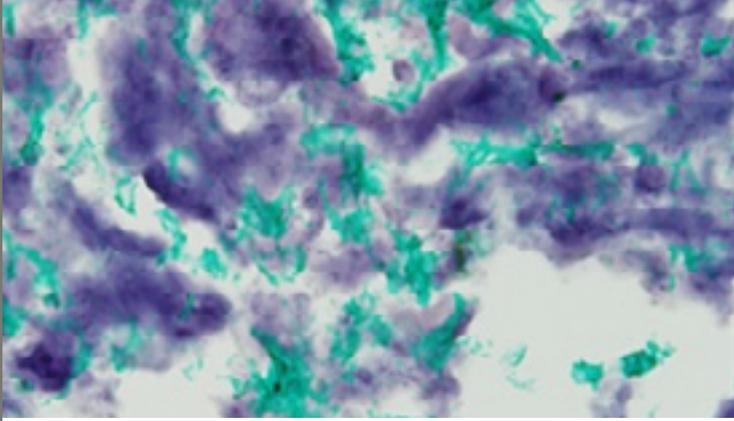
dans l'environnement, dans les tissus animaux et dans les aliments d'origine animale - chez les volailles et les porcs.

## Résultats

Des situations de contamination réalistes ont été reproduites grâce à des élevages expérimentaux d'animaux nourris avec de l'aliment contrôle ou contaminé par de l' $\alpha$ -HBCDD à deux doses différentes. Les résultats des analyses volatolomiques des foies des animaux ont confirmé nos précédents travaux puisque la composition du volatolome hépatique a permis de révéler la contamination des poules pondeuses, des poulets de chairs et des porcs aux deux doses d' $\alpha$ -HBCDD testées. Les familles chimiques des marqueurs candidats - hydrocarbonés, oxygénés, aromatiques et soufrés - se sont avérées cohérentes avec les résultats d'études médicales qui s'intéressent aux COVs (composés organiques volatils) en tant que marqueurs de pathologies, par exemple de certains cancers. Leur anabolisme ou catabolisme serait lié aux mécanismes réactionnels mis en œuvre lors de la détoxification hépatique.

## Perspectives

L'équipe MASS collabore avec le laboratoire SYMMES du CEA/CNRS (Grenoble), dans le cadre du projet ANR SENTINEL (2020-2024), pour développer des nez opto-électroniques capables de détecter facilement et sur le terrain les COVs proposés comme marqueurs de l'exposition aux contaminants chimiques.



© Susana Ribes

Micrographs recorded at 20x magnification of the different in vitro bread boluses after simulating in vitro oral digestion.

## Comment les déficiences orales modifient la bioaccessibilité des nutriments



### En savoir plus

Ribes S. *et al.*

Oral impairments decrease the nutrients bioaccessibility of bread in elderly

Food Hydrocolloids . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108202>

### Contacts

Véronique Santé-Lhoutellier et Marie-Agnès Peyron

UR QuaPA

[veronique.sante-lhoutellier@inrae.fr](mailto:veronique.sante-lhoutellier@inrae.fr)

[marie-agnes.peyron@inrae.fr](mailto:marie-agnes.peyron@inrae.fr)



### Contexte

Le vieillissement entraîne plusieurs modifications physiologiques au niveau de nombreux organes et fonctions tels que le système digestif mais impacte également la sphère orale. L'état bucco-dentaire chez les personnes âgées est souvent déficient et la conception d'aliments pour répondre aux besoins nutritionnels doit aussi considérer les capacités orales des individus. Malgré quelques travaux sur l'impact de la mastication déficiente sur la digestibilité de l'amidon ou des protéines des produits carnés et des pâtes), aucune étude segmentant diverses déficiences orales fréquemment retrouvées chez la personne âgée comme une perte de force, l'absence de salive, voire la combinaison de plusieurs déficiences n'a été réalisée. Nos travaux se sont focalisés sur un aliment traditionnel consommé par près de 98 % des Français : le pain, à hauteur de plus de 120 g/jour pour les plus de 55 ans. Il s'agit de mieux comprendre comment la santé bucco-dentaire module la structure et la microstructure du pain et impacte la libération des nutriments et leur digestibilité.

### Résultats

Quelle que soit la déficience orale considérée, les bols alimentaires obtenus ont des teneurs en D-glucose plus faibles par rapport à une mastication normale. De plus, la

combinaison des déficiences (baisse de force de mastication, absence de salive) accentue ce résultat. Il est probable que les particules les plus grandes de ces bols diminuent l'accessibilité de l'amidon pour l' $\alpha$ -amylase salivaire. Par ailleurs, au niveau des digestats, à la fin de la phase gastrique, la teneur en maltose est significativement plus élevée dans le cas du pain mastiqué avec déficience de force et en absence de salive, suggérant un retard dans la digestibilité de l'amidon. La digestibilité des protéines est également réduite, ce qui souligne l'impact de la phase orale sur l'ensemble du processus de digestion. Même si l'évolution de la structure secondaire des protéines n'explique pas ce résultat, l'étude de la microstructure des bols par microscopie infrarouge souligne un aspect plus compact des structures amyliques et protéiques. Ce travail démontre que les déficiences orales limitent, dans une certaine mesure, la bioaccessibilité des nutriments chez la personne âgée.

### Perspectives

Outre la perte nutritionnelle, la digestibilité réduite expose les personnes âgées à une augmentation de l'exposition du microbiote à ces nutriments. L'amélioration des connaissances sur la transformation orale des aliments et la digestion chez les personnes âgées est un prérequis pour concevoir de nouveaux aliments.



©AdobeStock - Leitenberger

# Améliorer l'appréciation de la saveur de la féverole par le consommateur



## En savoir plus

Karolkowski A. et al.

Heat Treatment, Cultivar and Formulation Modify the Sensory Properties and Consumer Acceptability of Faba Bean (*Vicia faba L. minor*) Protein Concentrates Foods . 2022

<https://doi.org/10.3390/foods11193018>

## Partenariat

- Groupe Soufflet-In Vivo et Groupe Avril (Thèse CIFRE)
- Chemosens, CSGA, Dijon



## Contacts

Adeline Karolkowski, Loïc Briand et Christian Salles

UMR CSGA

[adeline.karolkowski@inrae.fr](mailto:adeline.karolkowski@inrae.fr)

[loic.briand@inrae.fr](mailto:loic.briand@inrae.fr)

[christian.salles@inrae.fr](mailto:christian.salles@inrae.fr)



### Contexte

La féverole (*Vicia faba L. minor*) est une légumineuse principalement destinée à l'alimentation animale alors qu'elle présente de nombreux intérêts à la fois environnementaux, nutritionnels et fonctionnels (propriétés moussantes, émulsifiantes et gélifiantes). La valorisation de ce légume sec sous forme de concentrat, ingrédient riche en protéines obtenu par turbo-séparation, est en plein essor pour la formulation de nouveaux produits. Cependant, ces ingrédients sont caractérisés par des défauts de saveurs («off-flavours») qui limitent leur acceptabilité par les consommateurs et entraînent des pertes économiques importantes pour les fabricants. Une meilleure connaissance des facteurs responsables de la mauvaise appréciation de ces produits par le consommateur permettra d'élaborer des stratégies pour améliorer la saveur de ces concentrats de féverole et les rendre plus acceptables.

### Résultats

Un profil descriptif impliquant 21 panélistes entraînés et un test d'appréciation impliquant 80 consommateurs ont été mis en œuvre sur des concentrats de féverole incorporés dans un gel modèle. Les concentrats sont issus de trois cultivars différents de féverole et sont dégustés sous forme crue et cuite. Ces concentrats présentent des propriétés communes et individuelles, principalement liées à

leur cultivar et à l'application ou non de traitements thermiques. La corrélation des propriétés sensorielles avec la note d'appréciation des produits a montré que l'amertume ainsi que les notes vertes, métalliques et rances sont à l'origine de la faible appréciation de ces produits. Certains cultivars ne présentent pas ces défauts sensoriels et sont mieux appréciés des consommateurs. Par ailleurs, le traitement thermique a un effet important sur la réduction de ces derniers et favorise la production de notes qui améliorent significativement leur acceptabilité.

### Perspectives

Ce travail ouvre la voie vers de nouvelles recherches permettant de limiter les mauvais «goûts» dans les nouvelles sources de protéines végétales. Un choix plus pertinent des cultivars et une bonne maîtrise des étapes de transformation améliorera la saveur de ces ingrédients protéiques qui seront alors plus appréciés par les consommateurs. Ces résultats sont directement applicables par l'industrie agro-alimentaire pour le choix de stratégies permettant une meilleure appréciation des protéines végétales de féverole par les consommateurs.



© FreeImages-Biglebowski

## Le métabolisme du microbiote oral à l'origine de la perception d'arômes soufrés



### En savoir plus

Neiers F. *et al.*

Metabolism of Cysteine Conjugates and Production of Flavor Sulfur Compounds by a Carbon-Sulfur Lyase from the Oral Anaerobe *Fusobacterium nucleatum*

Journal of Agricultural and Food Chemistry . 2022

<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c01727>

Ce travail s'inscrit dans l'ANR JCJC FLAMME « Flavour metabolism in-mouth & perception modulation by oral microbiota enzymes » (ANR-22-CE21-0001).

### Partenariat

- Université de Valence (Espagne)



### Contacts

Mathieu Schwartz et Francis Canon

UMR CSGA

[mathieu.schwartz@inrae.fr](mailto:mathieu.schwartz@inrae.fr)

[francis.canon@inrae.fr](mailto:francis.canon@inrae.fr)



### Contexte

La perception de la saveur est un facteur clé dans l'acceptation ou le rejet d'un aliment. Les précurseurs d'arômes tels que les conjugués de la cystéine sont présents dans divers fruits et légumes ainsi que dans certains produits fermentés issus de ces végétaux (notamment le vin et la bière). Ces molécules n'ont pas de propriété sensorielle en tant que telle mais elles sont métabolisées en composés soufrés odorants dans la cavité buccale. Ces métabolites soufrés volatils ont une contribution importante à la saveur de certains aliments. Jusqu'à présent, les enzymes impliquées dans ce métabolisme étaient inconnues, bien que des études précédentes aient souligné l'implication probable d'enzymes du microbiote oral. La compréhension de ce métabolisme est une première étape pour caractériser la production d'arômes en bouche liée au microbiote oral et fournir des pistes d'amélioration de la saveur de certains aliments.

### Résultats

À partir d'une étude *ex vivo* menée sur la salive de différents sujets humains, les chercheurs ont montré que les précurseurs aromatiques tels que l'allyl-cystéine (présente dans l'ail mais aussi dans d'autres légumes et fruits), étaient métabolisés en trois types d'arômes soufrés différents : thiol, sulfide et disulfide. Une étude

approfondie a permis d'identifier une famille d'enzymes microbiennes potentiellement impliquée dans ce métabolisme : les carbone-soufre lyases. La caractérisation d'une carbone-soufre lyase impliquée dans ce métabolisme (FnaPatB1) a été menée chez la bactérie anaérobie *Fusobacterium nucleatum*, communément retrouvée dans la cavité orale. Cette enzyme, dont la structure cristallographique a été résolue, est capable de produire toute une gamme de molécules d'arômes soufrés à partir de divers précurseurs aromatiques, grâce à une architecture moléculaire unique au niveau de son site actif.

### Perspectives

Ce travail a permis de comprendre quelle famille d'enzymes est impliquée dans la formation en bouche de soufrés odorants issus de précurseurs aromatiques. Étant donné que les arômes soufrés ont des seuils de détection très bas (perçus même en faible quantité) et sont parfois associés à une aversion alimentaire, il est intéressant de mieux caractériser, voire de contrôler le métabolisme du microbiote oral. Un cribble enzymatique *in vitro* a permis d'identifier des molécules alimentaires réduisant cette activité métabolique. Cette étude ouvre la voie à un nouveau domaine de recherche, celui de la libération contrôlée d'arômes en bouche sous l'action du microbiote oral.



© Francis Canon

# Pourquoi certains arômes sont plus persistants que d'autres en bouche



## En savoir plus

Muñoz-González C. *et al.*

Molecular mechanisms of aroma persistence: From noncovalent interactions between aroma compounds and the oral mucosa to metabolism of aroma compounds by saliva and oral cells  
Food Chemistry . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131467>

## Partenariat

**ChemoSens**  
Plateforme de chimie sensorielle

## Contact

Francis Canon

UMR CSGA

[francis.canon@inrae.fr](mailto:francis.canon@inrae.fr)

**Qualiment**  
Institut national de la recherche scientifique et technologique



## Contexte

Comment expliquer que nous continuions à percevoir les arômes d'un bon plat en bouche plus ou moins longtemps après dégustation ? Ou même qu'un arôme désagréable persiste ? Cette durée de perception des notes aromatiques, qu'elles soient agréables ou non, a un impact très important sur le plaisir lié à l'alimentation. Cependant, les mécanismes moléculaires à l'origine de la persistance aromatique sont mal connus.

## Résultats

Les chercheurs ont couplé des approches *in vivo* et *in vitro* en utilisant un modèle de muqueuse orale humaine.

L'approche *in vitro*, a été menée à l'aide d'un modèle cellulaire de muqueuse orale, recréant la fine couche de protéines salivaires ancrées à la surface de nos cellules buccales, appelée pellicule mucosale. Les résultats montrent que les arômes interagissent avec la pellicule mucosale et sont retenus par cette dernière. D'autre part, les molécules d'arômes sont plus ou moins métabolisées en fonction de leur structure chimique par les cellules de la muqueuse orale. L'étude *ex vivo* s'intéressant à l'effet de la salive sur la libération des molécules d'arôme a montré que cette activité métabolique existe également au niveau salivaire.

Dans l'étude *in vivo*, 54 volontaires ont été reliés à un spectromètre de masse au niveau de leur cavité nasale permettant de suivre la libération des molécules d'arôme au cours du temps. Ces personnes ont ensuite dégusté une solution aromatisée avec cinq arômes différents. Le suivi de la libération des molécules d'arôme au cours du temps a montré une disparition plus rapide des molécules métabolisées ainsi que l'apparition de molécules issues de leur métabolisation. D'autre part, une partie du panel a évalué l'intensité aromatique au cours du temps d'une molécule métabolisée et d'une autre non-métabolisée. L'intensité de la molécule métabolisée a diminué plus rapidement que la molécule non-métabolisée.

Ces approches combinées ont permis de montrer pour la première fois que la muqueuse orale joue un rôle dans la persistance des arômes : les molécules d'arôme sont retenues au niveau de la pellicule mucosale où certaines sont métabolisées et d'autres non. Les molécules métabolisées persistent moins longtemps que celle qui ne le sont pas.

## Perspectives

Cette découverte offre de nouvelles perspectives pour mieux comprendre la persistance aromatique et comment d'autres molécules alimentaires telles que les tanins modulent cette dernière.



## Odeur sucrée, odeur salée et obésité



### En savoir plus

Aveline C. *et al.*

Influence of obesity on saltiness and sweetness intensity enhancement by odors

Food Quality and Preference . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2022.104685>

### Contact

Charlotte Sinding

UMR CSGA

[charlotte.sinding@inrae.fr](mailto:charlotte.sinding@inrae.fr)



### Contexte

Certains arômes, encore appelés odeurs, sont capables de renforcer la perception d'un goût salé ou sucré. Les mécanismes à la base de ce phénomène, encore méconnus, se produisent dans notre cerveau qui intègre le goût et les odeurs d'un aliment. Il peut ensuite produire une perception salée ou sucrée endogène à partir d'une odeur qui peut renforcer la perception salée ou sucrée exogène. Il semblerait que l'intégration de l'odeur et du goût dépende du degré d'exposition à ces deux perceptions au cours de la vie. Ainsi, des régimes alimentaires différents pourraient conduire à des associations différentes et donc un renforcement du goût par l'odeur plus ou moins important. Dans cette étude, nous avons testé 17 boissons salées ou sucrées contenant une odeur renforçatrice du goût sur 38 participants en situation d'obésité et 43 de poids normal.

### Résultats

Les personnes en situation d'obésité ont perçu un renforcement dans un plus grand nombre de boissons testées, avec une intensité du renforcement plus importante pour certaines de ces boissons que les personnes de poids normal. Par exemple, 83 % des participants en situation d'obésité ont perçu un jus de pomme contenant une

odeur de vanille comme étant plus sucré que le même jus sans odeur, contre 61 % des participants de poids normal. Parmi ces 83 %, 37 % ont perçu cette boisson plus sucrée qu'un jus de pomme contenant 33 % de sucre en plus, contre 6 % chez les participants de poids normal.

### Perspectives

Ce phénomène de renforcement de la saveur par l'arôme permettrait de réduire de façon significative les concentrations de sucre ou sel dans les aliments, chez soi ou dans des plats préparés. Nos résultats montrent que cette stratégie s'avère particulièrement efficace chez les personnes en situation d'obésité. Le transfert de ces connaissances aux grand public et entreprises agroalimentaires, pourrait permettre d'identifier des épices ou odeurs naturelles prometteurs pour améliorer l'alimentation. Par ailleurs, les mécanismes cérébraux liés à ces modifications de perception chez les personnes en situation d'obésité sont en cours d'étude, car ces personnes montrent des modifications structurales des zones cérébrales qui traitent ce renforcement de la saveur par l'odeur.



# Suivi des troubles olfactifs chez les personnes ayant subi une perte d'odorat lors de la COVID-19



## En savoir plus

Ohla K. *et al.*

A follow-up on quantitative and qualitative olfactory dysfunction and other symptoms in patients recovering from COVID-19 smell loss

Rhinology . 2022

<https://doi.org/10.4193/Rhin21.415>

## Partenariat

Consortium mondial pour la recherche sur les sens chimiques (Global Consortium for Chemosensory Research, GCCR), 760 membres dans 70 pays.

<https://gcchemosensr.org/>

## Contact

Thierry Thomas-Danguin

UMR CSGA

[thierry.thomas-danguin@inrae.fr](mailto:thierry.thomas-danguin@inrae.fr)



## Contexte

La perte soudaine de l'odorat est un symptôme précoce spécifique de la COVID-19, dont la prévalence, avant l'émergence du variant Omicron, était estimée entre 40 % et 75 %. Les déficiences chimiosensorielles et notamment la perte de l'odorat et du goût affectent la santé physique et mentale, ainsi que le comportement alimentaire. Il est donc essentiel de comprendre le niveau de récupération et l'évolution dans le temps de la perception des odeurs et des saveurs chez les personnes ayant contracté le SARS-CoV-2. Dans le cadre d'un consortium mondial (Global Consortium for Chemosensory Research, GCCR), une enquête longitudinale sur des personnes souffrant d'une perte d'odorat liée à la COVID-19 a évalué l'évolution des symptômes de la maladie et le niveau de récupération des fonctions gustatives et olfactives.

## Résultats

Les participants (n=12 313) qui avaient rempli une enquête initiale sur les symptômes respiratoires, les fonctions olfactives et gustatives et le diagnostic de la COVID-19 entre avril et septembre 2020, ont été invités à remplir une enquête de suivi. Entre septembre 2020 et février 2021, 27,5 % des participants ont répondu (n=3 386), 1 468 d'entre eux ayant reçu un diagnostic de COVID-19 et souffrant d'une perte d'odorat et de

goût concomitante au début de leur maladie. Au bout de 200 jours depuis l'apparition de la COVID-19, 60 % des femmes et 48 % des hommes inclus dans l'étude ont indiqué n'avoir recouvré que de 80 % de leur capacité olfactive d'avant la maladie. Les résultats ont montré que la perception des saveurs se rétablit généralement plus vite que la perception des odeurs, et la perte du goût persiste rarement si l'odorat se rétablit. La prévalence de la parosmie (trouble olfactif qui entraîne une distorsion des odeurs perçues) et de la phantosmie (forme d'hallucination olfactive) était d'environ 10 % au cours de l'enquête initiale et a augmenté fortement au cours de l'enquête de suivi pour atteindre 47 % pour la parosmie et 25 % pour la phantosmie. La persistance des troubles de l'odorat était associée à un plus grand nombre d'autres symptômes, ce qui suggère que ces troubles de la chimiosensorialité pourraient être des marqueurs clés de la maladie de la COVID à long terme, dit COVID long.

## Perspectives

Étant donné les impacts des troubles olfactifs et gustatifs sur le comportement alimentaire et plus largement sur l'état psychologique des individus, des recherches plus approfondies sur les options de traitement sont fortement justifiées étant donné que même des estimations prudentes suggèrent que des millions d'individus peuvent souffrir de parosmie après la COVID-19.

## Partie 4

### Élaborer des matériaux biosourcés **et valoriser les matières résiduelles**



© Claire Bourlieu-Lacanal - Riz colorés rouge et noire (Artémide-Tamtam)

Les produits et matériaux biosourcés sont des composants importants de la bioéconomie. Exploiter la diversité structurale et fonctionnelle des bioressources pour l'élaboration de matériaux biosourcés passe par la compréhension du rôle de l'eau et des nanocristaux dans les assemblages de cellulose. Cette approche permet également d'anticiper les impacts de la transition climatique sur la disponibilité et la qualité d'éco-matériaux à base de cellulose telles que les fibres de lin.

Une autre stratégie en faveur de la bioéconomie est de valoriser des matières résiduelles. Elle est ici illustrée par l'extraction des bioactifs du son de blé et le prétraitement des cultures intermédiaires pour augmentation la production de biogaz via la méthanisation.



© Claire Bourlieu-Lacanal - Riz colorés rouge et noire (Artémide-Tamtam)

## Puiser dans les sons de riz pour en extraire des bioactifs pour l'alimentation



### En savoir plus

Barros Santos M.C. *et al.*

Metabolomics of Pigmented Rice Coproducts Applying Conventional or Deep Eutectic Extraction Solvents Reveal a Potential Antioxidant Source for Human Nutrition

Metabolites . 2021

<https://doi.org/10.3390/metabo11020110>

### Partenariat

- Centre Français du riz, Arles, France
- Laboratory of Bioactives, Food and Nutrition Graduate Program, Federal University of State of Rio de Janeiro (UNIRIO), Rio de Janeiro, Brazil.
- Department of Environmental and Radiological Health Sciences, College of Veterinary Medicine and Biomedical Sciences, Colorado State University, Fort Collins, USA
- CIRAD, UMR Qualisud, F-34398 Montpellier, France. Qualisud, Univ Montpellier, Avignon Université, CIRAD, Institut Agro, Université de La Réunion, Montpellier, France.

### Contacts

Claire Bourlieu-Lacanal et Valérie Lullien Pellerin

UMR IATE

[claire.bourlieu-lacanal@inrae.fr](mailto:claire.bourlieu-lacanal@inrae.fr)

[valerie.lullien-pellerin@inrae.fr](mailto:valerie.lullien-pellerin@inrae.fr)



### Contexte

Le riz (*Oryza sativa L.*) est la deuxième céréale la plus cultivée et la plus consommée au monde. Sa transformation se traduit à l'échelle mondiale par des millions de tonnes de son de riz produites chaque année. Le son de riz renferme un large spectre de métabolites d'intérêt nutritionnel mais présente aussi une variabilité de compositions résultant de sa variété, des conditions de culture et d'obtention du son (abrasion, traitement de stabilisation). Afin de mieux valoriser ce co-produit, il est nécessaire de décrire cette variabilité. Nous avons regroupé une collection de 17 sons de riz regroupant des cultivars produits sur six localisations, à l'international (Brésil, États-Unis, Mali, Cambodge...) mais aussi en France sur le territoire Camarguais. Cette collection a été caractérisée en termes de profil granulométrique, teneur et activité de l'eau, lipidome et teneurs/empreinte en composés phénoliques. L'extraction efficace puis la caractérisation de ces composés phénoliques qui présentent une large gamme de polarités en raison de leur diversité structurale représente un défi. Ce défi a été relevé sur deux sources particulièrement riches : deux sons colorés (rouge Variété Tamtam, noir variété Artemide) cultivés en Camargue et fournis par le "Centre Français du Riz" via une extraction par des solvants verts suivi d'une caractérisation des extraits par chromatographie liquide à ultra-

performance couplée à la spectrométrie de masse en tandem (UPLC-MS-MS).

### Résultats

Des distributions de taille des particules et teneurs en eau variables ont été mises en évidence reflétant une variabilité de traitements post-récolte dans la collection de sons. Tous les échantillons de sons sont riches en lipides, y compris en lipides bioactifs (acides gras polyinsaturés, lipides polaires, oxylipines) ainsi que cela a été mis en évidence via le lipidome d'une partie de la collection. Une grande richesse en composés phénoliques a été caractérisée par des approches métabolomiques non ciblées sur des extraits conventionnels (eau/éthanol) ou verts (extraction par solvants eutectiques profonds – DES) de sons colorés. Ces solvants verts présentent des propriétés physiques similaires à celles des liquides ioniques bien connus, mais avec une toxicité plus faible et une formulation avantageuse en termes de coût, d'accessibilité et de durabilité.

### Perspectives

La caractérisation des sons de riz comme ingrédient fonctionnel pour l'alimentation humaine sera poursuivie ainsi que l'élargissement de la collection pour mieux comprendre l'effet des traitements post-récolte sur le profil en composés bioactifs des sons.

# La RMN du solide pour mieux appréhender le rôle de l'eau dans les assemblages de cellulose



## En savoir plus

Falourd X. *et al.*

Assessment of cellulose interactions with water by ssNMR:  $1\text{H} \rightarrow 13\text{C}$  transfer kinetics revisited

Carbohydrate Polymers . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120104>

## Partenariat



## Contacts

Xavier Falourd, Marc Lahaye et Corinne Rondeau-Mouro

UR BIA et UR OPAALE

[xavier.falourd@inrae.fr](mailto:xavier.falourd@inrae.fr)

[marc.lahaye@inrae.fr](mailto:marc.lahaye@inrae.fr)

[corinne.rondeau@inrae.fr](mailto:corinne.rondeau@inrae.fr)



## Contexte

Que ce soit dans les aliments (à base de végétaux) ou dans les matériaux biosourcés, l'eau joue un rôle essentiel au maintien des assemblages moléculaires. Il est primordial de bien comprendre et prédire les interactions de l'eau avec les biopolymères constitutifs de ces assemblages pour mieux maîtriser leurs propriétés et leurs usages. Pour cela, des techniques existent, mais seule la RMN permet d'obtenir une information fine à l'échelle sub-nanométrique, tout en préservant l'environnement naturel des objets d'étude.

## Résultats

Les mesures en RMN du solide permettent de relier des paramètres de dynamique des hydrogènes (protons en RMN) de l'eau avec sa capacité à fortement interagir avec la cellulose et à transmettre sa polarisation à travers les liaisons hydrogène sur des distances plus ou moins grandes et selon des cinétiques dépendant de phénomènes appelés diffusion de spin. Ces derniers correspondent à des transferts de magnétisation entre hydrogènes à travers les liaisons covalentes et l'espace. Nous avons revisité cette approche en optimisant l'acquisition du signal de RMN ainsi que son analyse rendue plus automatique, permettant ainsi de diviser par un facteur 17 la durée d'expérimentation tout en augmentant le nombre de pas de temps établissant cette cinétique. Cinq échantillons de cellulose présentant

des tailles de fibres et une cristallinité différentes ont ainsi été caractérisés. L'ajout d'eau dans ces échantillons a permis de moduler les interactions eau-cellulose.

Nous avons pu mettre en avant le temps de diffusion de spin décrit par trois valeurs différentes appelées  $T_{\text{HHa}}$ ,  $T_{\text{HHb}}$  et  $T_{\text{HHc}}$  que nous avons associées à trois tailles de domaines structuraux impliquant des liaisons hydrogène eau-cellulose et eau-eau. Selon nos hypothèses,  $T_{\text{HHa}}$  permet de sonder des échelles sub-nanométriques (échelle de la liaison hydrogène),  $T_{\text{HHb}}$  est relié à l'eau de structure autour des cristaux de cellulose, tandis que  $T_{\text{HHc}}$  caractérise l'eau ajoutée et permet de simuler un environnement aqueux tel que l'on peut rencontrer dans la nature.

## Perspectives

Afin de confirmer les hypothèses, les données de RMN du solide seront confrontées à celles issues de mesures d'adsorption d'eau obtenues par DVS (Dynamic Vapour Sorption) et de caractérisations mécaniques en DMA (Dynamic Mechanical Analysis). L'idée est également de complexifier les systèmes d'étude en analysant des assemblages proches de ceux rencontrés dans la nature, à base de cellulose, d'hémicelluloses et de lignines. L'ajout de données de RMN dans le domaine temps permettra d'accéder à des informations à une échelle supérieure (micromètre) et ainsi d'étendre notre approche multi-échelles par RMN.

# Adsorption de nanocristaux de cellulose à l'interface huile-eau : un phénomène irréversible



## En savoir plus

Haouache S. *et al.*

Edge-On (Cellulose II) and Face-On (Cellulose I) Adsorption of Cellulose Nanocrystals at the Oil-Water Interface: A Combined Entropic and Enthalpic Process *Biomacromolecules*. 2022

<https://doi.org/10.1021/acs.biomac.2c00201>

## Partenariat

- INRAE, UR BIA, Nantes, France
- ICMMP, Université de Poitiers-CNRS, Poitiers, France
- Beijing Engineering Research Centre of Cellulose and Its Derivatives, School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, P.R. China
- Laboratoire Léon Brillouin, Université Paris-Saclay, CEA-CNRS, CEA-Saclay, Gif-sur-Yvette, France
- CERMAV, University Grenoble Alpes, CNRS Grenoble, France.

## Contact

Isabelle Capron

UR BIA

[isabelle.capron@inrae.fr](mailto:isabelle.capron@inrae.fr)



## Contexte

La cellulose est une ressource naturelle qui est développée pour une grande variété d'applications en raison de sa combinaison unique d'abondance, de biodégradabilité et de stabilité chimique et mécanique. Une des briques élémentaires largement utilisées pour concevoir des matériaux biosourcés sont les nanocristaux de cellulose (CNC), en forme de bâtonnets, obtenus par hydrolyse des fibres de cellulose. Bien que considérés comme hydrophiles, les chercheurs ont démontré que ces CNC s'adsorbent efficacement aux interfaces huile-eau produisant des émulsions très stables appelées émulsions de Pickering, stabilisées uniquement par une couche de CNC. Ces émulsions ont suscité un vif intérêt ces dix dernières années, mais le mécanisme exact de leur formation reste à élucider.

## Résultats

Nous avons comparé l'organisation de deux types cristallins de CNC une fois adsorbés à la surface de gouttelettes d'huile dispersées dans l'eau. Les CNC-I proviennent de la cellulose native (cellulose I), et les CNC-II sont issus du procédé de mercerisation.

Afin d'illustrer les mécanismes d'adsorption, l'épaisseur de la couche de CNC a été déterminée par des expériences de diffusion de neutrons grâce à une variation des contrastes par des mélanges deutérés/hydrogénés.

- Dans le cas des CNC-I, l'épaisseur de

la couche formée est égale à 7 nm et indépendante de la concentration de cellulose, ce qui correspond à la largeur d'un cristallite de CNC-I. Cela montre que les CNC-I s'adsorbent à plat sur la surface selon un processus "Face-On" et que l'ajout de cellulose supplémentaire n'induit qu'une densification de la couche.

- Au contraire, la CNC-II forme une couche plus épaisse qui passe de 9 à 14 nm d'épaisseur avec l'augmentation de la concentration, alors que la largeur d'un cristallite de CNC-II n'est que de 3,5 nm. La CNC-II s'adsorbe alors avec un processus "Edge-on" se redressant perpendiculairement à la surface lors d'un ajout de cellulose.

Afin de mieux comprendre l'origine de ces deux comportements, des simulations de dynamique moléculaire (MD) ont été effectuées. Elles ont montré pour les deux CNC une migration spontanée des particules vers l'interface huile/eau s'établissant par des processus thermodynamiques selon des orientations préférentielles.

## Perspectives

Cette étude montre que la migration des CNC vers l'interface huile-eau est spontanée et irréversible. Elle confirme la très grande stabilité et variabilité de ces émulsions qui pourront être utilisées pour remplacer des tensioactifs dans des émulsions (peintures, bitumes), des matériaux alvéolaires, ou pour encapsuler des principes actifs (biocapteurs, phytosanitaires...).

# Anticipons les impacts de la transition climatique sur la disponibilité et la qualité des fibres de lin



## En savoir plus

Melelli A. *et al.*

Anticipating global warming effects: A comprehensive study of drought impact of both flax plants and fibres

Industrial Crops and Products . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115011>

## Partenariat

- Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, Lorient
- Laboratoire Génie de Production, LGP, Université de Toulouse, INP-ENIT, Tarbes
- LMGC, Université de Montpellier, CNRS, Montpellier
- Groupe Depestele, 14540 Bourguebus
- Synchrotron SOLEIL, DISCO Beamline, Gif-sur-Yvette
- Plateforme Métabolisme-Métabolome, Institute of Plant Sciences Paris-Saclay (IP2S), Université Paris-Saclay, National Committee of Scientific Research (CNRS),
- National Institute for Research for Agriculture, Food and Environment (INRAE), Université d'Evry, Université de Paris, 91190 Gif-sur-Yvette

## Contact

Johnny Beaugrand

UR BIA

[johnny.beaugrand@inrae.fr](mailto:johnny.beaugrand@inrae.fr)



## Contexte

La France est le premier producteur de lin-fibre au monde (125 000 hectares en 2022). Les fibres de lin, matières renouvelables composées de carbone biogénique (CO<sub>2</sub> atmosphérique) sont considérées comme durables. Aujourd'hui, le changement climatique est une menace pour cette culture, avec des accidents climatiques de plus en plus fréquents et longs, comme des sécheresses. A l'heure des engagements des accords de Paris et autres Green Deal Européen, la communauté des écomatériaux s'interroge sur la continuité de l'approvisionnement et de la qualité des fibres, dont la demande est en forte augmentation.

Dans le cadre du projet Européen FLOWER, nous avons collaboré avec des industriels cultivateurs de lin pour vérifier si les quantités et surtout la qualité de ces fibres resteraient adaptées à la production d'éco-composites et textiles.

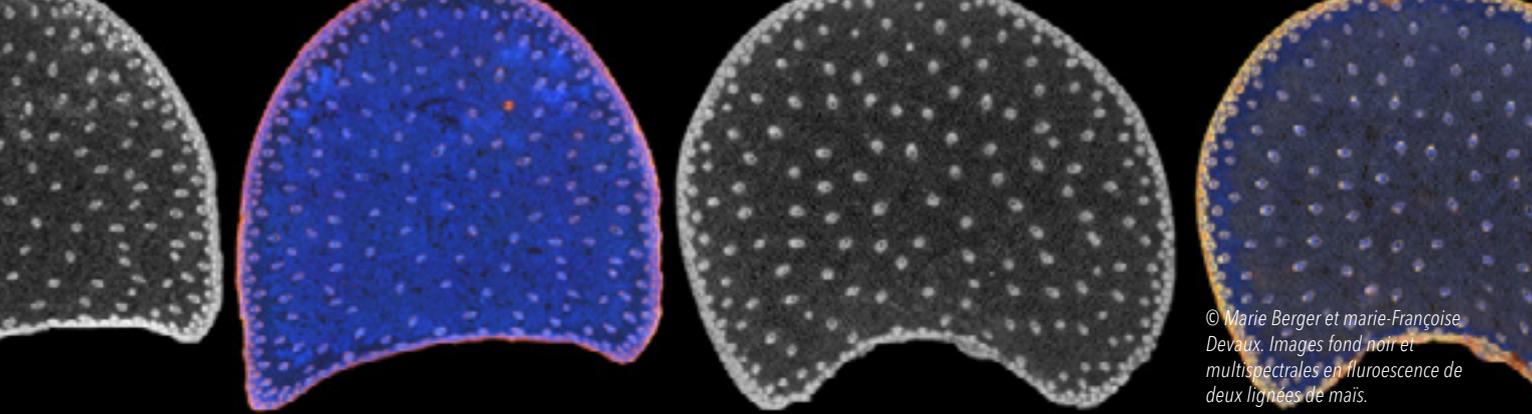
## Résultats

Deux lots du même cultivar de lin textile ont été cultivés en champs au cours de la même année sous deux conditions différentes : le témoin dans des conditions climatiques habituelles, et le second cultivé sous stress hydrique. La discrimination isotopique du carbone  $\delta^{13}C$ , révélateur d'un stress hydrique, indique clairement que les plantes carencées en eau ont souffert physiologiquement.

Nous avons caractérisé les dimensions des tiges de lin, leur composition et leurs propriétés mécaniques. Les tiges stressées par la sécheresse ont une morphologie plus petite, avec une diminution de hauteur (-28 %) et de diamètre (-16 %). Les analyses biochimiques ont montré une teneur contrastée en lignines entre les deux lots, ainsi qu'une quantité accrue de protéines chez les plantes stressées. Le suivi des acides aminés aromatiques par fluorescence UV au synchrotron SOLEIL a révélé des distributions spatiales contrastées de ces protéines. Pour les polysaccharides, les fibres stressées montrent une diminution importante de la cellulose, le polysaccharide de renfort des fibres. Étonnamment, malgré les différences sur les paramètres biochimiques et morphologiques, les propriétés mécaniques longitudinales des fibres des deux lots ne sont pas significativement différentes. Ceci suggère que la sécheresse peut affecter le rendement et la composition des fibres de lin mais n'impacterait pas nécessairement leurs performances mécaniques, suggérant des mécanismes de compensation chez la plante, avec peut-être plus de protéines structurales.

## Perspectives

Les travaux futurs porteront sur les variétés de lin les plus sensibles aux sécheresses ou au gel, projet que nous déposerons dans un projet ANR Bioéconomie.



© Marie Berger et Marie-Françoise Devaux. Images fond noir et multispectrales en fluorescence de deux lignées de maïs.

## Deux techniques pour évaluer la variabilité des tissus dans les tiges de maïs



### En savoir plus

Berger M. et al.

Darkfield and Fluorescence Macrovision of a Series of Large Images to Assess Anatomical and Chemical Tissue Variability in Whole Cross-Sections of Maize Stems

Frontiers in Plant Science . 2022

<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.792981>

### Partenariat

- Société Limagrain Europe

### Contacts

Marie-Françoise Devaux et Fabienne Guillon

UR BIA

[marie-francoise.devaux@inrae.fr](mailto:marie-francoise.devaux@inrae.fr)

[fabienne.guillon@inrae.fr](mailto:fabienne.guillon@inrae.fr)



### Contexte

Le maïs, plante fourragère la plus utilisée dans l'alimentation des vaches laitières, représente une des principales matières premières lignocellulosiques pour la chimie verte. Dans ces deux usages, des micro-organismes ou des enzymes dégradent les parois qui entourent les cellules végétales. Les tiges de maïs sont constituées de différents tissus - écorce, faisceaux conducteurs de sèves, parenchymes - dont la proportion et la composition des parois cellulaires varient en fonction du génotype et des facteurs agroclimatiques.

Pour comprendre le lien entre les propriétés de dégradation, la proportion et la composition des tissus, nous recherchons des méthodes de quantification permettant d'évaluer leur variabilité de manière représentative. Nous proposons deux techniques d'imagerie à l'échelle macroscopique, sans marquage et associées à de l'analyse d'images.

### Résultats

L'anatomie et la structure cellulaire de sections de tiges sont observées par imagerie en fond noir. Les composés phénoliques des parois cellulaires, en particulier la lignine, sont étudiés par imagerie multispectrale en autofluorescences UV et visible. L'échelle macroscopique permet d'observer des sections entières de tiges et de quantifier les caractéristiques morphologiques des tissus et leurs propriétés d'autofluorescence. En assimilant l'entrecœur à un cylindre et en tenant compte de la taille des cellules, les

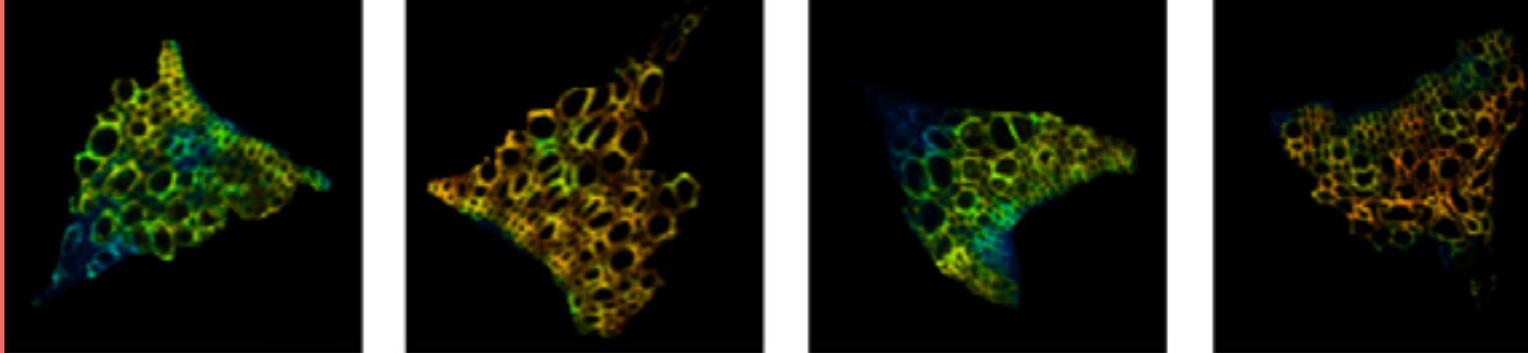
proportions relatives de parois cellulaires associées aux différents tissus sont estimées à partir des surfaces mesurées dans les sections. Les intensités de fluorescence dans l'image multispectrale sont étudiées sous la forme de pseudo-spectres.

Les principales variations morphologiques observées pour 14 lignées de maïs utilisées en sélection, portaient sur le diamètre des tiges, la quantité relative d'écorce et de parenchyme, la densité et la taille des faisceaux, le diamètre des cellules du parenchyme.

L'analyse des 14 lignées a permis de faire le lien entre les propriétés de fluorescence et la composition en composés phénoliques. La plus forte fluorescence visible a été observée dans l'écorce, tissu le plus lignifié. La quantité relative d'acide paracoumarique était associée à l'intensité de fluorescence UV dans l'écorce et dans le parenchyme proche écorce. La quantité d'acide férulique était significativement corrélée avec le parenchyme proche écorce. Nous avons montré qu'une quantité globalement plus élevée de lignine entraînait un niveau plus élevé de fluorescence visible dans tous les tissus.

### Perspectives

L'interprétation des propriétés de fluorescence sera confortée en utilisant des techniques complémentaires basées sur des marquage et immunomarquages sélectifs de la lignine, des acides férulique et paracoumarique, ainsi que des techniques d'imageries spectrales infrarouge ou Raman.



© Sacha Escamez - Imagerie du temps de vie de fluorescence d'un faisceau de xylème dans des sections transversales de tige d'*Arabidopsis thaliana* pour différents génotypes.

## Une autre façon de voir la lignine



### En savoir plus

Escamez S. *et al.*

Fluorescence lifetime imaging as an *in situ* and label-free readout for the chemical composition of lignin

ACS Sustainable Chemistry & Engineering 2022

<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c06780>

### Partenariat

- Plant Science Center, Université d'Umea, Suède
- INRAE/URCA FARE
- Plateforme d'Imagerie Cellulaire et Tissulaire de l'URCA

### Contact

Gabriel Paës

UMR FARE

[gabriel.paes@inrae.fr](mailto:gabriel.paes@inrae.fr)

### Contexte

La biomasse lignocellulosique représente une ressource de carbone renouvelable pour une économie durable. Elle est constituée de parois cellulaires principalement composées de trois types de polymères : la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Pour la bioraffinerie, la lignine est considérée à la fois comme une source potentielle de composés à haute valeur ajoutée et comme l'un des principaux marqueurs de récalcitrance au fractionnement nécessaire des polymères des parois végétales pour différentes applications. En raison des structures moléculaires formées pendant la polymérisation, la lignine est naturellement fluorescente. Ainsi, plusieurs tentatives pour relier la chimie de la lignine à sa fluorescence se sont appuyées sur le contrôle du spectre d'émission de la lignine. Cependant, jusqu'à présent, il a rarement été démontré que ces différences spectrales correspondent à des compositions chimiques spécifiques de la lignine. Il est donc nécessaire d'étudier une autre dimension de la fluorescence, qui pourrait être corrélée de manière plus fiable avec la composition chimique du fluorophore et favoriser une meilleure exploitation de la fluorescence de la lignine en tant que méthode de chimiotypage *in situ* et sans marquage.

### Résultats

Nous avons assemblé une population d'arbres génétiquement modifiés présentant différentes propriétés de paroi cellulaire du bois, telles que des compositions unitaires de lignine modifiées. En évaluant les caractéristiques de la composition chimique de la paroi cellulaire du bois ainsi qu'en enregistrant les paramètres de la durée de vie de la fluorescence par imagerie (FLIM) sur ces arbres, nous avons identifié les paramètres de FLIM qui peuvent prédire les caractéristiques de la composition chimique. Cette approche permet d'identifier spatialement les monolignols de type G et S, non seulement *in vitro* mais également *in vivo* : cette nouvelle méthode de chimiotypage basée sur la microscopie d'imagerie du temps de vie de fluorescence peut donc être utilisée pour répondre à des questions d'intérêt biologique et appliquées.

### Perspectives

Comme la lignine, d'autres molécules biologiques importantes sont connues pour leurs propriétés de fluorescence : collagène, kératine, élastine ou NADH. Ces molécules pourraient en théorie être caractérisées chimiquement *in situ* par FLIM, en développant des calibrations et modèles statistiques comme ceux développés ici pour la lignine.





© Clément Van Vlierberghe-  
Reproduction des procédés d'ensilage  
et de stockage alcalin à l'échelle du  
laboratoire.

## Méthanisation : augmenter la production de biogaz par un prétraitement à la chaux



### En savoir plus

Van Vlierberghe C. *et al.*

Conditions for efficient alkaline storage of cover crops for biomethane production

Bioresource Tehcnology . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126722>

Communiqué de presse INRAE publié le 2 février 2022

### Partenariat

- GRDF

### Contacts

Hélène Carrère et Renaud Escudie

UR LBE

[helene.carrere@inrae.fr](mailto:helene.carrere@inrae.fr)

[renaud.escudie@inrae.fr](mailto:renaud.escudie@inrae.fr)



### Contexte

Dans un contexte de développement des énergies renouvelables, la méthanisation agricole à partir des cultures intermédiaires multiservices environnementaux (CIMSE) présente de nombreux avantages. En plus de constituer une matière intéressante pour la production de biogaz, elles apportent de nombreux services environnementaux comme la protection des sols contre l'érosion, la régulation des adventices ou l'augmentation du stockage de carbone dans les sols. Comme elles sont récoltées sur une ou deux périodes, elles doivent être stockées par ensilage pour assurer une alimentation en continu des méthaniseurs tout au long de l'année. Cependant, ces cultures sont majoritairement composées de parois végétales dont les constituants comme les lignocelluloses, difficiles à dégrader, limitent l'accès aux composés que les microorganismes utilisent pour produire le méthane. C'est pourquoi des prétraitements permettant de casser les liaisons entre les lignines et ces composés permettraient d'améliorer la production de méthane.

### Résultats

Des travaux ont permis de mettre au point un procédé simple combinant le stockage et le prétraitement des CIMSE avant méthanisation en recourant à la chaux, couramment utilisée en agriculture pour le traitement des sols acides notamment. Les méthodes de

stockage (broyage, tassage, stockage anaérobie) ont été reproduites en laboratoire sur des récoltes de tournesol et de seigle. Une étape de mélange avec de la chaux à hauteur de 100 g par kilogramme de matière sèche de CIMSE a également été ajoutée avant le stockage pour le prétraitement.

Les mécanismes chimiques impliqués dans le prétraitement des CIMSE par la chaux ont premièrement été étudiés sur des durées courtes. Des expériences de stockage à long terme (6 mois) ont ensuite été réalisées sur des récoltes de seigle et de tournesol avec une teneur en matière sèche variable.

Sur les récoltes à faible teneur en matière sèche, les résultats montrent que la combinaison du stockage et du prétraitement ont conduit à une succession de fermentations qui ont provoqué une baisse du potentiel de production de méthane de 13 %. En revanche le prétraitement à la chaux s'est révélé efficace sur les cultures à forte teneur en matière sèche et a permis d'augmenter de 15 % leur potentiel de production de méthane, avec des résultats similaires sur le seigle et le tournesol.

### Perspectives

Ce procédé est une alternative prometteuse et simple à mettre en place par les agriculteurs pour combiner le stockage et le prétraitement des cultures intermédiaires pour optimiser la méthanisation, notamment si elles sont récoltées à un stade avancé.

## Partie 5

### Éclairer et appuyer

### les Politiques Publiques



© Pixabay - Brussels

Les activités de soutien aux politiques publiques sont aussi présentes dans nos travaux. Cela se traduit par la mise en place des interactions innovantes entre la science et les politiques publiques dans le domaine des déchets, à clarifier le vocabulaire autour des plastiques et à définir des questions d'éthiques en recherche pour la sécurité de l'alimentation infantile.



© Pixabay - Brussels

## Vers des interactions innovantes entre sciences et politiques publiques européennes



### En savoir plus

Duquennoi C. *et al.*

European Union's policymaking on sustainable waste management and circularity in agroecosystems: The potential for innovative interactions between science and decision-making  
*Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2022

<https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.937802>

### Contacts

Christian Duquennoi et José Martinez

UR PROSE

[christian.duquennoi@inrae.fr](mailto:christian.duquennoi@inrae.fr)

[jose.martinez@inrae.fr](mailto:jose.martinez@inrae.fr)



### Contexte

Depuis une cinquantaine d'années, l'Union Européenne a produit des politiques publiques sur les déchets. Bien que fondée sur les mêmes principes que pour les autres secteurs, la gestion des déchets de l'agriculture a été exclue de la Directive Cadre européenne sur les déchets depuis sa création en 1975 jusqu'à aujourd'hui. Les déchets et sous-produits dans les agroécosystèmes ont fait l'objet de nombreuses directives et réglementations spécifiques historiquement destinées à réduire les potentiels impacts négatifs de l'application de matières organiques résiduelles en agriculture. Depuis une décennie, l'intérêt grandissant pour l'économie circulaire a amorcé une mutation de la gestion « traditionnelle » des déchets, affectant tous les secteurs économiques et privilégiant les approches systémiques sur les approches plus conventionnelles « en silo ». La circularité dans les agroécosystèmes devrait donc devenir un sujet majeur des politiques publiques européennes, tout en souffrant d'un manque de cadre général, contrairement aux autres secteurs. De même, la valorisation en agriculture des matières résiduelles urbaines pourrait rapidement souffrir de blocages liés à des incompatibilités entre ces réglementations sectorielles. Une approche systémique de la question, servant de support à un cadre robuste de réglementation serait

nécessaire dans ce contexte.

### Résultats

Les formes innovantes d'interaction science - politiques publiques les plus directement accessibles aux chercheurs sont :

- Le « policy brief » : une synthèse concise sur un sujet particulier, sur les options de politique publique destinées à traiter le sujet et intégrant également des recommandations sur la meilleure option à considérer. Les policy briefs sont produits par des scientifiques qui y présentent des conseils fondés sur des faits scientifiques, à l'attention des acteurs des politiques publiques et dans un style qui les rendent accessibles à cette cible.
- Le « policy lab » : une équipe, une structure ou une entité dédiée à la conception de politiques publiques à l'aide de méthodes innovantes impliquant toutes les parties prenantes dans le processus de conception. Particulièrement adaptés aux sujets complexes, les policy labs émettent des propositions testées et validées par différentes formes d'expérimentation.

### Perspectives

Des formes innovantes d'interactions entre sciences et politiques publiques seraient des outils précieux susceptibles de faire avancer les politiques publiques européennes sur la circularité dans les agroécosystèmes.



# BIODEGRADABLE BIOAFBREEKBAAR



Conforme au Décret n° 2016-379 du mars 2016  
Sac réutilisable en polyéthylène - 100% recyclable

© Helene Seingier

## Clarifier l'ambiguïté des termes clés utilisés autour du plastique



### En savoir plus

Aubin S. *et al.*

Plastics in a circular economy: Mitigating the ambiguity of widely-used terms from stakeholders consultation

Environmental Science and Policy . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.04.011>

### Partenariat

Ce travail a été réalisé dans le cadre des projets Horizon 2020 NOAW (688338) et GLOPACK (773375).

### Contacts

Johnny Beaugrand, Patrice Buche et Nathalie Gontard

UR BIA et UMR IATE

[johnny.beaugrand@inrae.fr](mailto:johnny.beaugrand@inrae.fr)

[patrice.buche@inrae.fr](mailto:patrice.buche@inrae.fr)

[nathalie.gontard@inrae.fr](mailto:nathalie.gontard@inrae.fr)



### Contexte

La stratégie européenne sur le plastique (The European Plastic Strategy, European Commission, 2018) est une des nombreuses initiatives établies dans le monde pour développer une économie circulaire du plastique, principalement en augmentant le taux de recyclage du plastique et en bannissant son usage unique. Les plastiques biodégradables sont apparus comme une autre réponse aux déchets plastiques persistants dans notre environnement.

Cependant, toutes ces initiatives sont finalement affaiblies par la confusion qui règne autour des définitions et des mots utilisés – typiquement 'bio-based plastics', 'bioplastics', 'biodegradable plastics' et 'plastics recycling'. L'usage inapproprié de l'un ou l'autre de ces termes a mis en doute leur réel bénéfice en ébranlant la compréhension et la confiance des parties prenantes.

### Résultats

La définition consolidée du terme 'biodegradable plastics' suggère que deux catégories de matériaux prédomineraient dans la communauté des emballages : les plastiques biodégradables et les plastiques compostables industriellement, sans recouvrement de ces deux terminologies.

Nous proposons de distinguer les définitions de plastique 'recycling' et 'downcycling'. La première implique une opération de récupération par laquelle le déchet plastique est

retransformé en un plastique dont les propriétés techniques sont très proches de celles du plastique original. La seconde implique une opération de récupération, répétable plusieurs fois, par laquelle le déchet plastique est converti en un matériel de moindre qualité que celui d'origine. Le terme 'bio-based plastics' réfère clairement à l'origine de la ressource alors que 'biodegradable', 'recycling' et 'down-cycling' réfèrent à la fin de vie du matériel. Le seul terme qui réfère simultanément à ces aspects est 'bioplastics', terme que les experts trouvent le plus ambigu. Dans ce terme, le préfixe 'bio', référant soit à l'origine de la ressource, soit à la fin de vie du matériel, reste difficilement compréhensible. Nous déconseillons son utilisation, surtout avec les personnes non-expertes (telles que les citoyens et le large public), au profit des termes 'bio-based plastics' et/ou 'biodegradable plastics'.

### Perspectives

De plus amples discussions semblent nécessaires pour parvenir à une définition consensuelle et claire de propriétés aussi complexes et de mécanismes tels que la biodégradation et le recyclage. Il peut être objecté que ces deux termes sont interconnectés, la biodégradation pouvant être considérée comme un recyclage parfait de plastiques biodégradables qui réintègrent ainsi le cycle naturel du carbone via le compostage domestique et la photosynthèse pour produire une nouvelle biomasse similaire.



© AdobeStock - cs333

# Éthique et bonnes pratiques en recherche pour la sécurité sanitaire des aliments infantiles



## En savoir plus

Thomopoulos R. *et al.*

Good practices and ethical issues in food safety related research

Global Pediatrics . 2022

<https://doi.org/10.1016/j.gped.2022.100016>

## Partenariat

Partenariat public-privé du projet européen SAFFI



## Contacts

Rallou Thomopoulos et Erwan Engel

UMR IATE et UR QuaPA

[rallou.thomopoulos@inrae.fr](mailto:rallou.thomopoulos@inrae.fr)

[erwan.engel@inrae.fr](mailto:erwan.engel@inrae.fr)



## Contexte

Un engagement du projet européen SAFFI (Safe Food for Infants in the EU and China) est de s'assurer et de démontrer que les recherches menées dans le cadre du projet respectent les bonnes pratiques et les recommandations concernant les questions éthiques soulevées par les activités du projet, qui concernent la sécurité sanitaire des aliments pour jeunes enfants en Europe et en Chine. Ce travail a pour objectif de documenter les principes éthiques du projet et d'illustrer par des exemples les questions saillantes soulevées par le projet.

## Résultats

Différentes facettes des questions éthiques ont été examinées : protection de l'environnement et de la sécurité des personnels, utilisation d'échantillons biologiques, protection des données personnelles, implication de pays tiers, participation d'humains. Elles mettent en évidence la diversité des problématiques soulevées par les recherches en sécurité sanitaire des aliments. Parmi ces différentes facettes, deux principales ont été plus spécialement examinées, à savoir la protection de l'environnement des expérimentations et en particulier du personnel de recherche, et l'aide à la

décision pour la gestion de la sécurité sanitaire des aliments. Ce dernier aspect inclut à la fois des questions d'éthique de la décision, lorsque des préoccupations diverses et différents acteurs de la société sont impliqués, et des questions de gestion des données personnelles.

Une vision historique de l'éthique de la recherche et les principaux courants de pensée sont introduits, puis quelques exemples de recherche dans le domaine de la sécurité alimentaire permettent d'illustrer les questions éthiques soulevées, les principes éthiques appliqués et les principales mesures prises dans les cas considérés.

## Perspectives

En mettant en évidence diverses préoccupations concernant les bonnes pratiques et les questions éthiques dans la recherche liée à la sécurité sanitaire des aliments, l'objectif de ce travail est de sensibiliser un public académique, industriel, universitaire ou plus large à la variété et à la complexité des questions soulevées et à leur étroite imbrication avec la législation.

# Contactez nos unités



## Auvergne - Rhône-Alpes

CENTRE DE RECHERCHE EN ODONTOLOGIE CLINIQUE (USC CROC)  
UNIV CLERMONT AUVERGNE - FACULTE CHIRURGIE DENTAIRE  
2 rue de Braga Faculté de Chirurgie Dentaire  
63100 CLERMONT-FERRAND  
martine.hennequin@uca.fr

### QUALITE DES PRODUITS ANIMAUX (UR QUAPA)

INRAE Site de Theix  
63122 SAINT-GENÈS-CHAMPANELLE  
+33 (0)4 73 62 41 90  
quapa-ara@inrae.fr

### REDUIRE, VALORISER, REUTILISER LES RESSOURCES DES EAUX RESIDUAIRES (UR REVERSAAL)

INRAE Site VILLEURBANNE - LA DOUA  
5 rue de la Doua CS 20244  
69625 VILLEURBANNE Cedex  
+33 (0)4 72 20 89 04  
jean-marc.choubert@inrae.fr



## Bourgogne - Franche Comté

### CENTRE DES SCIENCES DU GOUT ET DE L'ALIMENTATION (UMR CSGA)

AgroSup Dijon-CNRS-INRAE-Université de Bourgogne  
21065 DIJON Cedex  
+33 (0)3 80 68 16 23  
dir.csqa@inrae.fr



### TECHNOLOGIE ET ANALYSES LAITIÈRES (UR TAL)

INRAE - 39801 POLIGNY Cedex 1  
+33 (0)3 63 57 20 00  
solange.buchin@inrae.fr

## Bretagne - Normandie

### OPTIMISATION DES PROCÉDES EN AGRICULTURE, AGROALIMENTAIRE ET ENVIRONNEMENT (UR OPAALE)

INRAE RENNES - BEAUREGARD  
17 avenue de Cucillé CS 64427 35044 RENNES cedex  
+33 (0)2 23 48 21 55  
anne.tremier@inrae.fr

### SCIENCE ET TECHNOLOGIE DU LAIT ET DE L'ŒUF (UMR STLO)

INRAE - AgroCampus Ouest  
35042 RENNES Cedex  
+33 (0)2 23 48 53 22  
yves.le-loir@inrae.fr



## Grand-Est

### FRACTIONNEMENT DES AGRO-RESSOURCES ET ENVIRONNEMENT (UMR FARE)

INRAE - Université de Reims Champagne Ardenne - Centre de

recherche en environnement et agronomie  
51686 REIMS CEDEX 2  
33 (0)3 26 77 35 92  
gabriel.paes@inrae.fr



## Hauts-de-France

### UNITE MATERIAUX ET TRANSFORMATIONS (UMR UMET)

CNRS - Université de Lille 1 - Ecole nationale supérieure de Chimie - INRAE  
59651 VILLENEUVE-D'ASCQ Cedex  
33 (0)3 20 43 54 00  
patrice.woisel@ensc-lille.fr

## Ile-de-France

### INSTITUT JEAN-PIERRE BOURGIN (UMR IJPB)

INRAE - AgroParisTech  
78026 VERSAILLES Cedex  
+33 (0)1 30 83 30 00  
ijpb@inrae.fr



### FOOD AND BIOPRODUCT ENGINEERING (UMR SAYFOOD)

AgroParisTech - INRAE  
91744 MASSY Cedex  
+33 (0)1 69 93 50 26  
catherine.bonazzi@inrae.fr

### GENIE DES PROCÉDES FRIGORIFIQUES POUR LA SECURITE ALIMENTAIRE ET L'ENVIRONNEMENT (UR FRISE)

INRAE Site ANTONY  
1 rue Pierre Gilles de Genes CS 10030 92761 ANTONY cedex  
+33(0)1 40 96 60 21  
anthony.delahaye@inrae.fr

### PROCÉDES BIOTECHNOLOGIQUES AU SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT (UR PROSE)

INRAE Site ANTONY  
1 rue Pierre Gilles de Genes CS 10030 92761 ANTONY cedex  
+33(0)1 40 96 60 40  
theodore.bouchez@inrae.fr

## Nouvelle Aquitaine

### ŒNOLOGIE (UMR Œ)

INRAE - ISVV  
Faculté d'Œnologie  
33882 Villenave d'Ornon  
+33 (0)5 57 57 58 58  
patrick.lucas@u-bordeaux.fr



# Contactez nos unités



## INSTITUT DE MECANIQUE ET INGENIERIE DE BORDEAUX (USC I2M)

INRAE - CNRS - Université Bordeaux  
Campus Talence, 33405 Talence  
+33 (0)5 40 00 28 47  
thierry.palin-luc@ensam.eu

## Occitanie Pyrénées-Méditerranée

### INGENIERIE DES AGROPOLYMERES ET TECHNOLOGIES EMERGENTES (UMR IATE)

INRAE - Montpellier SupAgro - CIRAD - Université Montpellier  
34060 MONTPELLIER Cedex 1  
+33 (0)4 99 61 35 43  
christian.sanchez@inrae.fr



### SCIENCES POUR L'AGROLOGIE (UMR SPO)

INRAE - Montpellier SupAgro - Université Montpellier  
34060 MONTPELLIER Cedex 1  
+33 (0)4 99 61 22 41  
fabienne.remize@inrae.fr

### LABORATOIRE DE BIOTECHNOLOGIES ET ENVIRONNEMENT (UR LBE)

INRAE  
avenue des Étangs 11100 NARBONNE  
+33 (0)4 68 42 51 51  
nicolas.bernet@inrae.fr



### PECH ROUGE UNITE EXPERIMENTALE (UE PR)

INRAE - 11430 GRUISSAN  
+33 (0)4 68 49 44 00  
nicolas.saurin@inrae.fr

### CHIMIE AGRO-INDUSTRIELLE (UMR CAI)

INRAE - INPT - ENSIACET  
31030 TOULOUSE Cedex 04  
+33 (0)5 34 32 35 00  
direction.lca@ensiacet.fr

### TOULOUSE BIOTECHNOLOGY INSTITUTE (UMR TBI)

INRAE - INSA - CNRS  
31077 TOULOUSE CEDEX 4  
+33 (0)5 61 55 94 01  
direction\_tbi@insa-toulouse.fr



### TOULOUSE WHITE BIOTECHNOLOGY (UMS TWB)

31520 RAMONVILLE SAINT-AGNE  
+33 (0)5 61 28 57 80  
twb@inrae.fr



## Pays de la Loire

### BIOPOLYMERES, INTERACTIONS ET ASSEMBLAGES (UR BIA)

INRAE - 44316 NANTES Cedex 03  
+33 (0)2 40 67 50 31

Equipe PRP : INRAE - 35653 LE RHEU Cedex

+33 (0)2 23 48 52 16  
biadir-nantes@inrae.fr

### STATISTIQUES, SENSOMETRIE ET CHIMIOMETRIE (USC StatSC)

INRAE - Oniris  
44322 NANTES Cedex 3  
+33 (0)2 51 78 54 50  
evelyne.vigneau@oniris-nantes.fr

### GENIE DES PROCÉDÉS ENVIRONNEMENT - AGROALIMENTAIRE (USC GEPEA)

INRAE - Oniris - Université de Nantes  
44322 NANTES Cedex 3  
+33 (0)2 51 78 54 27  
jeremy.pruvost@univ-nantes.fr

## Provence - Alpes - Côte d'Azur

### BIODIVERSITE ET BIOTECHNOLOGIE FONGIQUES (UMR BBF)

INRAE - Aix-Marseille Université - Faculté des Sciences  
13288 MARSEILLE Cedex 09  
+33 (0)4 91 82 86 00  
marie-noelle.rosso@univ-amu.fr



### SECURITE ET QUALITE DES PRODUITS D'ORIGINE VEGETALE (UMR SQPOV)

INRAE - Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse - Domaine Saint-Paul  
84914 AVIGNON Cedex 9  
+33 (0)4 32 72 25 00  
isabelle.souchon@inrae.fr



### ARCHITECTURE ET FONCTION DES MACROMOLECULES BIOLOGIQUES (USC AFMB)

INRAE - CNRS - Aix-Marseille Université  
13288 MARSEILLE Cedex 09  
+33 (0)4 91 82 55 60  
secretariat@afmb.univ-mrs.fr





INRAE - Département TRANSFORM  
3 impasse Yvette Cauchois  
CS 71627  
44316 Nantes Cedex 03  
Tél. : +33 1 (0)2 40 67 51 45  
transform@inrae.fr

Rejoignez-nous sur :



<https://www.inrae.fr/departements/transform>

**Institut national de recherche pour  
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement**

